Waldbau und Forstmeteorologie

Wirtschaftliche Folgerungen aus den Untersuchungen des Forstmeteorologischen Institutes München in den Jahren 1924 bis 1938

Von Max Woelfle, Regierungsforstrat

München 1938

Referent: Geheimrat Professor Dr. E. Fabricius

Waldbau und Forstmeteorologie

Wirtschaftliche Folgerungen aus den Untersuchungen des Forstmeteorologischen Institutes München in den Jahren 1924 bis 1938

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Staatswirtschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt

von

Max Woelfle München

1938

 Druck J. Neumann-Neudamm.

Gliederung

Einleitung

Das Meteorologische Institut der Forstlichen Versuchsanstalt München hat unter Leitung des Vorstandes, Herrn Geheimrat Professor Dr. A. Schmauß, seit dem Jahre 1924 Außenuntersuchungen in großer Zahl und von teilweise grundlegender Bedeutung durchgeführt. Ganz besonders hat sich auf diesem Gebiet Herr Professor Dr. R. Geiger hervorgetan, der von 1924 bis mit 1937 an dem Institut gearbeitet hat. Von ihm wurden Veröffentlichungen über das Gesamtgebiet der Klein- und Mikroklimatologie sowie über viele Einzelfragen herausgegeben, die von richtunggebender Bedeutung sind[1]). Der Verfasser ist seit 1930 Mitarbeiter des Institutes; in gemeinsamen Untersuchungen wurde er in das weite und vielfältige Gebiet der Forstmeteorologie eingeweiht; im Laufe der letzten Jahre hat er in einer Reihe selbständiger Untersuchungen und Veröffentlichungen insbesondere die Windverhältnisse des Waldes bearbeitet (Sturmschäden, Windschutz, Verhagerung, Windgeschwindigkeit im und am Walde, Windschutzanlagen usw.).

Die Arbeiten des Institutes wurden stets und in jeder Hinsicht von der Bayerischen Landesforstverwaltung (früher Ministerialforstabteilung) gefördert; insbesondere hat sich Herr Ministerialrat Dr. Th. Künkele, Sachbearbeiter für das Forstliche Versuchswesen in Bayern, durch Stellung von Untersuchungsaufgaben, Mitarbeit und Beschaffung der notwendigen Hilfsarbeiter und Mittel sehr um die Arbeiten des Institutes verdient gemacht.

Die Zusammenarbeit mit den anderen Fachinstituten der Forstlichen Versuchsanstalt München war in allen Fällen für beide Teile wertvoll und anregend; sie hat die Untersuchungen stets gefördert und in Einzelfällen zu Ergebnissen geführt, deren Bedeutung weit über den Rahmen des Arbeitsgebietes des Forstmeteorologischen Institutes hinausging.

Die Untersuchungsergebnisse wurden zum größten Teil im Forstwissenschaftlichen Zentralblatt veröffentlicht; damit waren sie den bayerischen Forstleuten regelmäßig zugänglich gemacht. Unsere Arbeiten sollten nicht nur zur Lösung der verschiedensten Fragen im Bereiche des Naturgeschehens beitragen, sondern sie hatten auch die Bestimmung, die Maßnahmen der Forstwirte ertragreicher, einfacher und sicherer zu gestalten. Die letztere Aufgabe haben sie nicht so vollkommen erfüllt, wie wir es erhofft hatten; die Wirtschafter haben bei ihren Planungen noch nicht immer die Folgerungen aus unseren Untersuchungen gezogen.

In der vorliegenden Abhandlung wird der Versuch gemacht, dem Forstmann die waldbaulichen Folgerungen darzustellen, die aus den Untersuchungen des Forstmeteorologischen Institutes gezogen werden können und sollen. Es kann sich jedoch dabei nur um einen großen Rahmen handeln, in dem einzelne Punkte festgelegt werden:

---

[1]) Z. B. R. Geiger, Das Klima der bodennahen Luftschicht. Sammlung „Die Wissenschaft", Band 78, Braunschweig, 1927.

die ungeheure Vielgestaltigkeit der Verhältnisse im Walde läßt sich nie auf eine starre Formel bringen, sie erfordert die gestaltende Hand des mit den örtlichen Verhältnissen vertrauten Wirtschafters, nur er ist imstande, auf Grund seiner Erfahrungen (oder der seiner Vorgänger) die jeweils erfolgreichsten Maßnahmen zu treffen.

Die im Laufe der letzten Jahrzehnte an den Deutschen Wald gestellten hohen Ansprüche haben auf die Forschung großen Einfluß ausgeübt: die Aufgaben der einzelnen Institute wurden nicht nur erweitert, sondern die Untersuchungen auch so rasch vorwärtsgetrieben, daß es für den Wirtschafter fast unmöglich war — und in Zukunft immer schwieriger werden wird, — die neuesten Forschungen auf allen Gebieten, die mit der Forstwirtschaft mittelbar oder unmittelbar zusammenhängen, zu kennen und bei seinen wirtschaftlichen Maßnahmen zu berücksichtigen. *Die vorliegende Arbeit erfüllt ihren Zweck, wenn sie dem Forstmann die zu ziehenden waldbaulichen Folgerungen aus den Untersuchungen des Institutes in den letzten 16 Jahren darbietet, ohne daß er alle Einzelversuche durcharbeiten muß.*

Wie groß das Interesse der Forstleute an unseren Untersuchungen ist, geht daraus hervor, daß wir bei allen Außenabeiten von ihnen hervorragend unterstützt wurden; auch an dieser Stelle wird für die wertvolle Mitarbeit verbindlichst gedankt.

I. Grundlegendes

Geschichtliche Entwicklung

Die ersten forstmeteorologischen Abhandlungen erschienen am Anfang des 19. Jahrhunderts in Frankreich und in der Schweiz[2]); meist ohne irgendwelche Untersuchungen wurden Betrachtungen über den Einfluß des Waldes auf das Klima (Niederschlag, Temperatur, Gewitter- und Hagelhäufigkeit usw.) angestellt; nennenswerte Bedeutung haben diese Anschauungen nicht, obwohl sich im Volksglauben ähnliche Meinungen noch heute finden. Im Laufe des 19. Jahrhunderts und besonders in der zweiten Hälfte desselben wurden dann in Deutschland eine Reihe klassischer Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf das Klima durchgeführt (Ebermayer, Mütterich, Schubert usw.). So wertvolle Ergebnisse sie auch geliefert haben, so erreichten sie doch nur in den seltensten Fällen ihr Ziel, denn die Fragestellung war großenteils so, daß eine Antwort darauf bei dem damaligen Stand der meteorologischen Geräte nicht möglich war, oder daß es darauf überhaupt keine Antwort gibt.

Es ist nämlich nicht möglich, allgemein gültige d. h. für alle Einzelfälle geltende Regeln für die Abwandlung der Temperatur, des Niederschlages, des Windes usw. als Auswirkung des Waldes aufzustellen. Die Einzelfälle sind so vielgestaltig und teilweise so grundverschieden voneinander, daß allgemeine Regeln gerade das für jeden Einzelfall Wesentliche verwischen müssen. Von den viel umstrittenen Wohlfahrtswirkungen des Waldes können nur drei als für alle Fälle einwandfrei erwiesen gelten:

1. die Erhöhung der Nachhaltigkeit der Quellen (und damit der Verringerung der Hochwassergefahr; langsames Abtauen der Schneedecke);
2. die Verhinderung der Abschwemmung der obersten Bodenschichten an steilen Hängen (bzw. der Entstehung der Lawinen);
3. die Abschwächung des Windes in der Nähe von Wäldern.

In den letzten Jahrzehnten ist allgemein anerkannt worden, daß Wald und Klima nicht in einseitiger, sondern in Wechselbeziehung zueinander stehen: es besteht eine Unzahl gegenseitiger Abwandlungsmöglichkeiten; außerdem sind die meteorologischen Einzelkräfte vielfach ineinander verflochten und treten in dieser Verflechtung in Erscheinung. Es hat sich gezeigt, daß nur durch die genaue Untersuchung einer sehr großen Zahl von Einzelfällen die Gesetzmäßigkeiten im Bereiche der Forstmeteorologie herausgeschält werden können. Wie bei einem großen Gebäude Stück für Stück zusammengefügt wird, so muß auch auf dem Gebiet der Forstmeteorologie Untersuchung an Untersuchung gereiht werden, um die vielfältigen und zahlreichen Wechselbeziehungen zwischen Wald und Klima zu einem vollkommenen und alles umfassenden Bild zusammenzusetzen.

[2]) Veranlaßt waren diese Arbeiten durch die rasche Zunahme der Entwaldung als Folge der französischen Revolution.

Heutiger Stand der Forstmeteorologie

Die forstmeteorologische Forschung wurde in den letzten Jahrzehnten sehr rasch vorwärtsgetrieben; dieses schnelle Fortschreiten hat namentlich drei Ursachen gehabt:

1. Die hohen Anforderungen, die an die Leistungsfähigkeit des Waldes (besonders in Deutschland) gestellt wurden, verlangen eine eingehende Untersuchung aller Einzelkräfte, die das Wachstum der Bäume fördern bzw. hemmen.

2. Durch die grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiete der Kleinklimatologie — besonders von Prof. Dr. W. Schmidt, Wien, und Prof. Dr. R. Geiger, München — wurden Meßverfahren entwickelt und vervollkommnet, die vergleichbare Untersuchungsergebnisse gewährleisten und es ermöglichen, aus den zahlreichen Einzeluntersuchungen wertvolle Zusammenfassungen vorzunehmen. Durch diese Feststellung sollen die wichtigen Ergebnisse früherer forstmeteorologischer Forschungen in ihrer Bedeutung nicht geschmälert werden. Mangels einheitlicher Versuchsdurchführung eignen sie sich jedoch großenteils nicht zur Verarbeitung zu einem großen einheitlichen Bild. Die Versuchsanordnungen waren meist so verschieden, daß keine einheitliche Linie zu einer zusammenfassenden Verarbeitung gefunden werden kann.

3. Hand in Hand mit dem raschen Fortschreiten der forstmeteorologischen Forschung ging eine außergewöhnlich schnelle Entwicklung und Vervollkommnung der meteorologischen Geräte einher. Die geringsten Temperatur-, Feuchtigkeits- und Windgeschwindigkeitsänderungen können heute auf kleinstem Raum gemessen, ja sogar laufend aufgezeichnet werden. Viele Fragen lassen sich mit diesen hochentwickelten Geräten beantworten, deren Lösung früher sehr erschwert oder ganz unmöglich gewesen wäre.

Bei dem heutigen Stand der meteorologischen Geräte gibt es wohl kaum noch Fragen auf dem Gebiete der Forstmeteorologie, deren Beantwortung aus gerätetechnischen Gründen unmöglich wäre.

Bedeutung der Forstmeteorologie für den Waldbau

Ausgehend von volkswirtschaftlichen Erwägungen muß die Begründung und Pflege des Waldes auf Grund der Ansprüche der einzelnen Holzarten unter Berücksichtigung der Boden- und Klimaverhältnisse vorgenommen werden. Abgesehen von außerordentlichen Bodenverhältnissen ist die Bedeutung des Klimas diesen mindestens gleichgeordnet: durch das Klima wird das Verbreitungsgebiet der Holzarten in den meisten Fällen begrenzt.

Die für Deutschland in großer Zahl und in ausgezeichneter Durcharbeitung vorhandenen Klimawerke genügen als klimatische Grundlagen für den Waldbau aus drei Gründen nicht:

1. Die Abwandlungen klimatologischer Einzelkräfte des G r o ß klimas sind in diesen Werken nicht enthalten (z. B. Windführung durch Geländeausformung);

2. Das für das Gedeihen der Bäume oft ausschlaggebende K l e i n klima kann ihnen nicht entnommen werden (z. B. Frostlagen);

3. Neben den Klimagrößen, d. h. den durchschnittlichen Werten der Witterungseinzelkräfte, müssen auch noch die meteorologischen Beobachtungen, d. h. Einzelwerte für

Sonderfälle in Betracht gezogen werden können; diese Angaben können den Klimawerken nicht oder nicht in genügendem Maße entnommen werden (z. B. Spitzenwerte der Windgeschwindigkeit bei hügeligem Gelände).

Sehr beachtlich ist die Gegenüberstellung der Bedeutung der Mittelwerte der klimatologischen Einzelkräfte und der Höchst- und Tiefstwerte, die von Ernst[3]) vorgenommen wurde; er weist auf den unter Umständen ausschlaggebenden Einfluß der letzteren hin.

So wertvoll und bahnbrechend die Schaffung von Klimazonen, z. B. [4]) oder [5]), zur Gewinnung eines großen Überblickes ist, so dürfte sie doch als klimatologisch-meteorologische Grundlage für die Wahl der Holzart und die Bewirtschaftung des Waldes namentlich in nicht ganz eindeutigen Fällen unzureichend sein (Köppen hat eine derartige Anwendung auch wohl nie im Auge gehabt).

Schon mehrfach wurden Versuche unternommen Temperatur und Niederschlag formelmäßig in Zusammenhang zu bringen und diese Formel im Waldbau zu verwenden (z. B. Cieslars „Vegetationsquotient“ $\frac{N}{T}$ und Langs „Regenfaktor“ $\frac{N}{T}$, wobei N der Niederschlag und T die Temperatur in einem bestimmten Zeitabschnitt darstellt); für einen Überblick mögen diese Versuche Hinweise geben, für Entscheidungen in Einzelfällen sind sie dagegen nicht brauchbar.

Der von Oelkers[6]) für die einzelnen Holzarten berechnete Regenfaktor ($Rf = \frac{N}{T} \cdot 100$, wobei Rf = Regenfaktor, N = mittlerer täglicher Niederschlag in der Wachstumszeit Mai mit September in Millimeter und T = mittlerer Wärmegrad in Grad C während der Wachstumszeit in Seehöhe des Bestandes) kann nur innerhalb eines bestimmten Klimabereiches und in ebenem oder nahezu ebenem Gelände annäherungsweise Geltung haben. Eine Reihe von Einzelkräften, welche auf das Wachstum unserer Waldbäume Einfluß haben, kommen darin nicht oder nicht in genügendem Maße zum Ausdruck. Wird z. B. N verdoppelt, so ergibt sich der gleiche Regenfaktor, wie wenn T halbiert wird, trotzdem in beiden Fällen ein grundverschiedenes Klima herrscht. Die Länge der Wachstumszeit tritt in der obengenannten Formel ebensowenig in Erscheinung wie die Winterfeuchtigkeit; beide Größen können örtlich von ausschlaggebender Bedeutung für das Wachstum sein (letztere z. B. für den Grundwasserstand). Ähnlich verhält es sich mit der Niederschlagshäufigkeit (bzw. regelmäßig oder häufig wiederkehrenden Dürrezeiten) in der Wachstumszeit; zwar wird die Niederschlagshäufigkeit von Oelkers zusätzlich erwähnt, im Regenfaktor ist sie jedoch nicht enthalten.

Verdunstungsmessungen gehören zu den schwierigsten Untersuchungen im Bereiche der Meteorologie; die von Oelkers angegebenen Zahlen wurden durch Messungen über freien Wasserflächen vor mehreren Jahrzehnten gewonnen. Die Anordnung bei solchen Untersuchungen ist von so maßgebendem Einfluß, daß die herrschenden meteorologischen Verhältnisse an dem Meßort durch sie vollständig überdeckt werden können, und gerade diese sollten einwandfrei und vergleichbar erfaßt werden.

---

[3]) F. Ernst, Die Bedeutung der Klimaextreme für den Waldbau in Mitteleuropa. Forstwiss. Centralbl., 1934, S. 86.

[4]) H. Mayr, Waldbau auf naturgesetzlicher Grundlage. Berlin, 1909, S. 53 ff.

[5]) Köppen-Geiger, Handbuch der Klimatologie. Band I, S. C 14 ff.

[6]) J. Oelkers, Waldbau. Hannover, 1930, S. 90 ff.

Nach Münch[7]) ist der Wind ein Standortsfaktor ersten Ranges; er ist in dem Regenfaktor von Oelkers nicht enthalten und tritt nur mittelbar bei der Verdunstung, die Oelkers zusätzlich anführt, in Erscheinung.

Der Regenfaktor von Oelkers kann nur dort von Bedeutung für die Holzartenwahl sein, wo das Großklima das Klein- und Mikroklima überwiegt, d. h. wo auf großem, ebenem Gelände mit nur weiträumig sich ändernden Boden-, Niederschlags- und Temperaturverhältnissen das Kleinklima zurücktritt; aber auch dort wäre eine Berücksichtigung der im Regenfaktor fehlenden meteorologischen und klimatologischen Kräfte (s. oben) wünschenswert. In hügeligem oder bergigem Gelände mit raschem Wechsel der Hanglagen, der Bodenausformung, der Wasserführung im Boden, der Windverhältnisse und besonders der ausschlaggebenden Bedeutung des Kleinklimas (z. B. Frostlagen) dürfte ihm keine praktische Bedeutung zukommen.

Es soll hier als Beispiel nur auf die Bestockung der SW-Hänge (Kiefer) und der NE-Hänge (Buche) hingewiesen werden, die häufig in der Pfalz angetroffen wird (Th. Künkele wies zuerst auf diesen Tatbestand hin; [siehe [22])]). In den von Oelkers zur Bestimmung des Regenfaktors vorgeschlagenen Klimawerken sind für beide Hangrichtungen die gleichen Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse angegeben; trotz der ausschlaggebenden Bedeutung dieser beiden verschiedenen Hangrichtungen errechnet sich der gleiche Regenfaktor!

Neben den klimatologischen Grundlagen (Groß-, Klein- und Mikroklima) sind für den Forstwirtschafter auch die meteorologischen Erscheinungen innerhalb seines Wirtschaftsgebietes von großer Bedeutung.

Im nachfolgenden wird unter Benutzung der festgelegten Bezeichnungen[8]) Kleinklimatologie als Klimatologie auf einheitlich beeinflußtem, beschränktem Raume, der aber noch so groß ist, daß mit den Geräten der Großklimatologie gearbeitet werden kann (z. B. Temperaturverteilung in einem Fichtenaltholz), verstanden, während in der Mikroklimatologie die Verhältnisse auf kleinstem Raum, der andere Geräte und Meßverfahren verlangt (z. B. Temperaturverteilung an einem sonnenbeschienenen Fichtenstamm), untersucht werden.

Begrenzung der vorliegenden Arbeit

Eine zusammenfassende Abhandlung über alle bisher vorgenommenen forstmeteorologischen Messungen ginge weit über den Rahmen dieser Untersuchung hinaus; sie würde auch aus den schon erwähnten Gründen teilweise auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoßen. Eine größere Anzahl wichtiger forstmeteorologischer Untersuchungen wird nicht behandelt oder angeführt, weil sie nicht innerhalb des gesteckten Rahmens liegen. Es sollen nur die waldbaulichen Folgerungen aus den im Forstmeteorologischen Institut München durchgeführten Untersuchungen (A. Schmauß, R. Geiger, H. Amann u. Verfasser) gezogen werden, weil die zahlreichen forstmeteorologischen Messungen anderer Institute und Forscher teils schon waldbaulich verwertet wurden, teils nicht geeignet

---

[7]) E. Münch, Neuere Fortschritte der Pflanzenphysiologie und ihrer Anwendung in der Forstwirtschaft. Tharandter Forstl. Jahrb., 1921, S. 239.

[8]) R. Geiger und W. Schmidt, Einheitliche Bezeichnungen in kleinklimatischer und mikroklimatischer Forschung. Biokl. Beiblätter, Heft 4, 1934, S. 153.

sind, darauf wirtschaftliche Maßnahmen aufzubauen. Namentlich wenn sie von Forstleuten ohne eingehende meteorologische Kenntnisse oder von Meteorologen ohne genügenden forstlichen Überblick durchgeführt wurden, sind sie größtenteils nicht geeignet, darauf waldbauliche Maßnahmen zu gründen — ihr Verdienst liegt dann meist nur auf dem Gebiet der Vergrößerung unserer Naturerkenntnis.

Da die vorliegende Arbeit auch für den Wirtschafter bestimmt ist, werden weder eingehende meteorologische Kenntnisse vorausgesetzt, noch wird nicht unumgänglich notwendiges Schrifttum angeführt. Durch diese beiden Einschränkungen soll die Abhandlung dem Wirtschafter zugänglicher gemacht werden, sie soll ihm Mittel in die Hand geben, die durch klimatologische und meteorologische Kräfte verursachten Einflüsse im Walde möglichst auszuschalten, soweit sie hemmender, und weitgehend auszunützen, soweit sie fördernder Art sind. Die gewonnenen Erkenntnisse haben nicht nur etwa für Bayern oder Süddeutschland Gültigkeit, sondern sie können sinngemäß in allen Gebieten angewandt werden, die ähnliche klimatologische Verhältnisse aufweisen wie Mitteleuropa.

II. Temperatur

Sieht man von künstlichen Wärmequellen ab, so hängt die Temperatur der Freiluft vorzüglich von Ein- und Ausstrahlung ab; abgewandelt wird sie noch durch Wasserdampfkondensation (= Erwärmung) und Verdunstung (= Abkühlung); in der Nähe von wärmeren oder kälteren festen und flüssigen Körpern tritt ein Ausgleich der verschiedenen Temperaturen auf dem Wege der Wärmeleitung oder Scheinleitung ein. Durch Luftverfrachtung kann die Temperatur an einem bestimmten Ort höher oder niedriger werden, als es den dortigen Ein- und Ausstrahlungsverhältnissen entsprechen würde.

Die Temperatur der oberirdischen Pflanzenteile weicht häufig und teilweise ganz beträchtlich von der Lufttemperatur ab. Ohne Berücksichtigung der Verdunstung, die immer eine Temperaturerniedrigung mit sich bringt, sind die Pflanzenteile bei starker Sonneneinstrahlung wärmer und bei nächtlicher Ausstrahlung kälter als die umgebende Luft.

Aus dieser kurzen Zusammenfassung ist ersichtlich, daß die wahre Lufttemperatur, die in der Großklimatologie gemessen wird, nicht allein maßgebend für die Lebensvorgänge einer Pflanze ist. In der Mikroklimatologie werden deshalb auch seit einigen Jahren Untersuchungen über die Temperatur von Pflanzenteilen bei den verschiedenen Witterungsbedingungen vorgenommen: entweder wird mit sehr kleinen Meßgeräten (Thermoelemente, die so klein sein können, daß sie in eine Fichtennadel eingeführt werden) die Temperatur unmittelbar gemessen oder es werden Versuchskörpertemperaturen zur Bestimmung der Temperaturen der Pflanzenteile verwendet[9]). Diese letztgenannten Thermometerkörper sind strahlungsempfindlich, sie geben also eine durch Strahlung beeinflußte Temperatur an, die einen ähnlichen Verlauf zeigt wie die Temperatur der Pflanzenteile; eine völlige oder auch nur weitgehende Übereinstimmung wird allerdings nie für alle Fälle erreicht werden. Beide erwähnte Meßverfahren eignen sich jedoch nur für den Fachmeteorologen.

Bei den häufig von Forstleuten forschend vorgenommenen Temperaturmessungen empfiehlt es sich, die Lufttemperatur zu messen, und aus diesen Angaben Rückschlüsse auf die Temperatur der Pflanzenteile zu ziehen. Sind in diesem Falle die Thermometer ungünstig aufgestellt, so können die gewonnenen Ergebnisse wertlos sein und die aufgewendete Mühe ist umsonst[10]). Eine fachmännische Beratung über Meßgeräte und Meßanordnung ist in allen Fällen empfehlenswert.

---

[9]) R. Geiger, Mikroklimatische Beschreibung der Wärmeschichtung am Boden. Meteorologische Zeitschrift, 1936, S. 357, und 1937, S. 133 und S. 278.

[10]) A. Büdel, Der Strahlungsschutz am Thermometer. Zeitschrift für angew. Meteorologie, 1933, Heft 8, S. 226.

Von den zahlreichen Fragen über die Temperaturverhältnisse im Walde wurden von uns in größeren Untersuchungen die Fröste, die Temperaturabhängigkeit von der Hanglage und die Temperaturverhältnisse in verschiedenartigen Beständen behandelt; nachfolgend werden daraus die waldbaulichen Folgerungen gezogen.

Fröste

Die Schäden, die durch sehr tiefe Temperaturen während der Winterruhe der Pflanzen auftreten, scheiden für unsere Betrachtungen aus; es werden nur Maßnahmen gegen Beschädigungen, die nach Beginn (Spätfröste) bzw. vor Beendigung der Wachstumszeit (Frühfröste) eintreten, besprochen.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen

1. Temperaturerniedrigung, die durch Heranführen von Kaltluft durch das Großwettergeschehen auf weiten Flächen verursacht wird, und
2. Frostgraden, die ihre Entstehung der nächtlichen Ausstrahlung verdanken.

Gegen die durch 1. verursachten Beschädigungen gibt es keine Maßnahmen (abgesehen von dem Anbau frostharter bzw. spätaustreibender Holzarten bzw. Bedeckung der jungen Pflanzen im Pflanzgarten). In diesem Falle erfrieren die jungen Pflanzenteile auf weiter Fläche, unabhängig von der Bodenausformung und dem Bestandsalter, weil die vom Winde hergetragene Kaltluft das ganze Gelände überflutet. Glücklicherweise kommt diese Art von Frösten, für die der Name „Advektivfröste“ sinngemäßer wäre als „Windfröste“, selten vor.

Die Strahlungsfröste entstehen nur in klaren Nächten und an besonders dafür geeigneten Orten. Abhängig ist dabei die Temperaturerniedrigung

1. von der Lufttemperatur am Abend (meist hat ein Kaltlufteinbruch für den Strahlungsfrost „vorgearbeitet“);
2. von dem ungestörten Gesichtskreis am Ausstrahlungsort (je mehr der Gesichtskreis z. B. durch Bäume oder Geländeausformung eingeengt ist, desto geringer die Ausstrahlung);
3. von der Luftbewegung (schon mäßiger Wind durchmischt die Luft so stark, daß sich kein Kaltluftsee ausbilden kann);
4. vom Wassergehalt der Luft (je feuchter die Luft, desto geringer die Ausstrahlung; aufkommende Wolken oder Nebel setzen der Ausstrahlung ihre Grenze);
5. von der Größe der ausstrahlenden Fläche; ausschlaggebend ist nicht die Ausstrahlung der Luft, genauer des darin enthaltenen Wasserdampfes und der Kohlensäure, sondern die der festen und flüssigen Körper. (Ein vielfach vertretener Irrtum im Schrifttum soll hier richtiggestellt werden: Die Größe der Ausstrahlung ist unter sonst gleichen Bedingungen nur von der Flächen-einheit, dagegen nicht von der Flächenausgestaltung abhängig. Der bekannte „Grasfrost“ ist nicht durch die große Oberfläche der einzelnen Grashalme und -blätter bedingt, sondern nur durch den fehlenden Wärmenachschub vom Boden her; das Gras bildet eine Wärmeschutzschicht, und deshalb tritt in der Höhe der Grasspitzen starker Frost auf);
6. von der Wärmenachfuhr vom Boden her (je wärmer der Boden und je größer seine Wärmeleitfähigkeit desto geringer die Frostgefahr);

7. von der während der Nacht stattfindenden Verdunstung (lebende Pflanzen kühlen sich stärker ab als tote, weil sie Wasser in Dampfform abscheiden);
8. von der Abflußmöglichkeit der entstehenden Kaltluft (kältere Luft ist schwerer als wärmere, sie fließt im geneigten Gelände ab und bildet deshalb am Ort ihrer Entstehung keinen Kaltluftsee);
9. von der Durchmischungsmöglichkeit der Kaltluft mit darunterliegenden, nicht durch Ausstrahlung abgekühlten Luftschichten (je näher die strahlenden Pflanzenteile am Boden sind, desto geringer ist die Möglichkeit, daß sich die an ihnen entstehende und dann absinkende kalte Luft mit darunterliegender wärmerer Luft mischen kann; in einem Stangen- oder Altholz entstehen keine Strahlungsfrostbeschädigungen, obwohl die Ausstrahlung dort ebenso groß wie auf einer Kultur- oder Kahlfläche ist, weil die Kaltluft absinken kann oder von dem in Gipfelhöhe herrschenden Wind weggeführt wird).

Nicht oder nur wenig kann der Forstmann die unter Punkt 1, 4, 6 und 7 genannten Bedingungen beeinflussen, dagegen lassen sich die unter 3 und 5 aufgeführten Abhängigkeiten etwas und die unter 2, 8 und 9 zusammengestellten stark abwandeln. Bei Maßnahmen gegen Ausstrahlungsfröste handelt es sich demnach für den Forstmann in erster Linie um Verminderung der Ausstrahlung (= Abschirmung des Gesichtskreises, denn die im Garten-, Obst- und Weinbau angewandten Frostschutzmaßnahmen, insbesondere räuchern, heizen und bedecken, kommen in der Forstwirtschaft im großen nicht in Frage; sie lassen sich nur im Pflanzgartenbetrieb anwenden, dort sind sie aber ganz am Platze und werden auch mit gutem Erfolg durchgeführt) und Schaffung einer Abflußmöglichkeit für die entstandene Kaltluft und Durchmischung mit wärmerer Luft.

Strahlungsfrost und Geländeausformung

Die (effektive) Ausstrahlung ist unter sonst gleichen Umständen um so größer, je freier der Gesichtskreis ist. F. Lauscher[11]) hat eingehende Untersuchungen über die Abhängigkeit der Ausstrahlung von der Größe der Abschirmung des Gesichtskreises durchgeführt. Seine Ergebnisse wurden in Abbildung 1 verwendet; für waagerechte und senkrechte Flächen (Zweige, Nadeln und Blätter sind ein wirres Gemisch von beiden) ist die Gesamtausstrahlung in der Mitte einer kreisrunden, gleichförmig abgeschirmten Mulde in Beziehung zur Ausstrahlung bei völlig freiem Gesichtskreis gebracht (Abbildung 1). Als Längenmaßstab dient der (logarithmisch aufgetragene) Durchmesser der Mulde von Kamm zu Kamm. Die logarithmische Teilung wurde gewählt, um die Ausstrahlungsverhältnisse von Kahlflächen mit kleinem Durchmesser zu veranschaulichen. Bei linearer Teilung des Durchmessers der Kahlflächen ergibt sich ein sehr steiler Anstieg der Ausstrahlungslinie bis zum Durchmesser 3,0 und dann ein weiterer sehr sanfter. Für die beiden Schaulinien sind noch einige Voraussetzungen notwendig gewesen (gleiche Temperatur der ausstrahlenden und der abschirmenden Fläche und ein bestimmter Dampfdruck); eine Abwandlung der beiden angenommenen Größen innerhalb des in der Natur in Deutschland vorkommenden Spielraums bewirkt keine wesentliche Verlagerung der beiden Schaulinien. Es handelt sich nicht um die Darstellung

[11]) F. Lauscher, Wärmeausstrahlung und Horizonteinengung. Sitzungsberichte der Akademie d. Wiss. in Wien, Abteilung IIa, 1934, S. 503.

der mathematisch genau berechneten Ausstrahlungsgröße, die für die vielfältigen Verhältnisse in einem Schaubild gar nicht möglich ist, sondern um einen Überblick und Anhalt für den Forstmann.

R. Geiger[12]) hat nach den Untersuchungen von F. Lauscher [siehe [11])] die Ausstrahlungsverhältnisse am Bestandsrand berechnet; dabei hat sich gezeigt, daß der Ausstrahlungsschutz nur auf einem sehr schmalen Streifen längs des Bestandes nennenswert wirksam ist; im Abstand der Bestandshöhe wird die Ausstrahlung nur um etwa 10 % gegenüber den Verhältnissen über Freiland verringert; unmittelbar am Bestandsrand finden wir 50 % der Freilandausstrahlung.

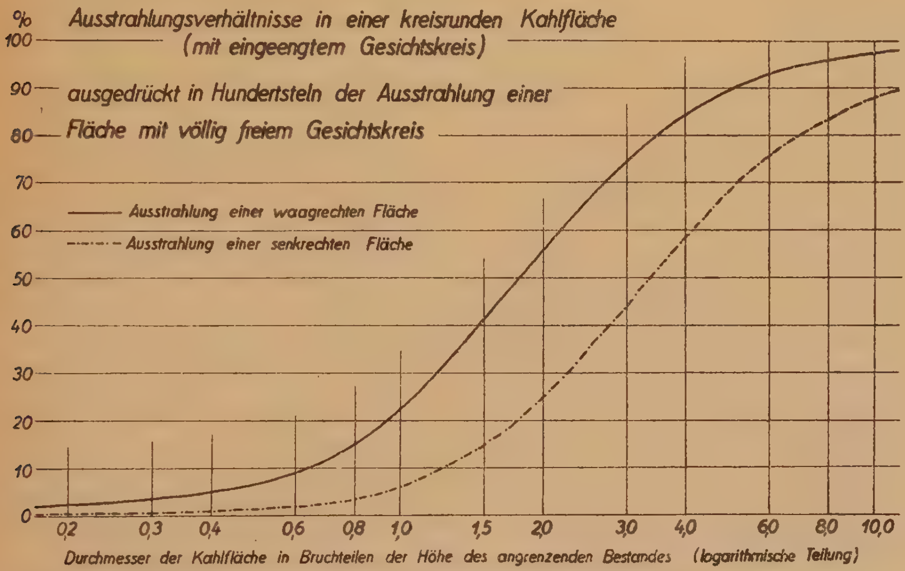


Abb. 1. Die Ausstrahlung in der Mitte einer ringsum gleichförmig abgeschirmten Kahlfläche in Beziehung zu der Ausstrahlung einer Fläche mit völlig freiem Gesichtskreis

Aus Abbildung 1 ist zu entnehmen, daß eine nennbare Herabsetzung der Ausstrahlung durch die Abschirmung des Gesichtskreises bei den meisten Mulden nicht eintritt, denn die Höhe des Muldenkammes müßte mehr als ein Viertel des Muldendurchmessers betragen; so tiefe Mulden kommen nur selten vor.

Finden wir einerseits keine wesentliche Herabsetzung der Ausstrahlung in einer Mulde durch Abschirmung des Gesichtskreises, so ergibt sich andererseits eine starke Erhöhung der Frostgefährdung durch Herabfließen der Kaltluft von den Muldenwänden in die Muldenmitte. Die Frostschäden durch Ausstrahlung entstehen insbesondere in Bodennähe von Mulden, weil die an den ausstrahlenden Körpern (Boden und Pflanzenteilen) sich bildende Kaltluft bei Windstille nicht mit den wärmeren, darübergelegenen Luftschichten gemischt wird und infolge ihrer größeren Schwere in geneigtem Gelände dicht über dem Boden oder der Pflanzendecke nach tieferen Teilen abfließt und sich dort sammelt, wo der weitere Abfluß durch eine Erhebung ver-

[12]) R. Geiger, Weitere Bemerkungen zum Kleinklima am Bestandsrand. Forstwiss. Centralbl., 1936, S. 262.

hindert wird. Wir finden an den Muldenwänden (bzw. Berghängen) und insbesondere auf deren oberen Teilen eine wesentliche Herabminderung der Frostgefahr durch Ausstrahlung, weil die entstandene Kaltluft nach tieferen Teilen abfließt und durch wärmere ersetzt wird, in der Muldenmitte dagegen eine Erhöhung der Frostgefahr durch Zusammenströmen der Kaltluft von den angrenzenden Hängen. Dabei ist die Gefahr für die Muldensohle um so höher, je größer das Einzugsgebiet der Kaltluft ist. In sehr tiefen Mulden können verheerende Frostschäden auftreten, wenn jede Windbewegung fehlt und die ganze Kaltluft der Hänge auf der kleinen Grundfläche der Mulde sich staut (Dolinen).

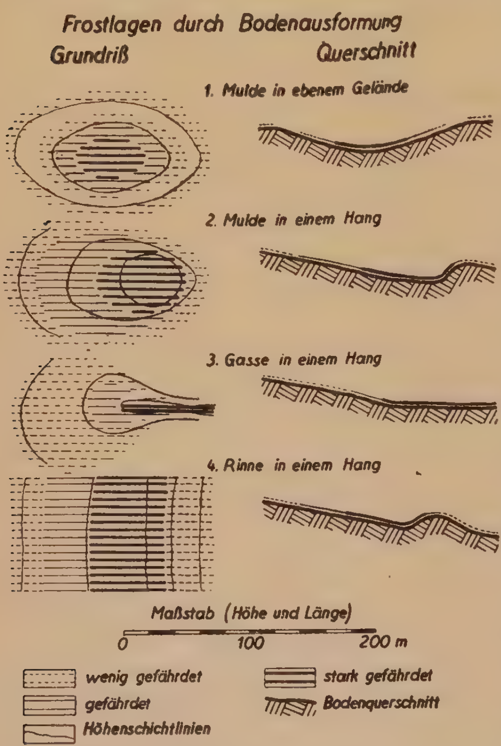


Abb. 2. Vereinfachte Darstellung der am meisten durch Ausstrahlung gefährdeten Stellen bei verschiedener Geländeausformung

Auf Abbildung 2 sind einige häufig vorkommende Fälle in *vereinfachter* Form dargestellt. Bei Fall 1 (Mulde in ebenem Gelände) sind die Muldenränder meist nicht gefährdet, weil die Kaltluft dort abfließen kann, und auch die Muldenmitte wird bei kleinem Einzugsgebiet der Kaltluft nicht so stark und in dem Umfang gefährdet, wie bei Fall 2 (Mulde in einem Hang), denn dort fließt die Kaltluft von dem ganzen über der Mulde liegenden Hang zusammen. Bei starker und langdauernder Ausstrahlung kann jedoch der Kaltluftsee so sehr steigen, daß auch die obersten Muldenränder von ihm erfaßt werden. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei Fall 3, die Kaltluft fließt von dem Hang durch die Mulde in die Geländegasse und wirkt besonders dann sehr ungünstig, wenn die Gasse kein starkes Gefälle hat, das einen weiteren Abfluß bewirken würde. Eine waagerecht in einem Hang verlaufende Rinne (Fall 4) hat eine ähnliche Wirkung wie Fall 2: bei großem Einzugsgebiet der Kaltluft ist die Rinne in ihrer ganzen Ausdehnung stark gefährdet, es ist sogar möglich, daß ein Überfließen über den Rand auf die unteren Teile des Hanges eintritt. In den Fällen 2 mit 4 sind die oberen Teile des Hanges nicht oder nur wenig gefährdet und zwar umso weniger, je steiler der Hang ist.

Eine sinngemäße Abwandlung der vier angeführten Beispiele ermöglicht das Erkennen der Frostgefährdung bei allen in der Natur vorkommenden Geländeausformungen.

Strahlungsfrost und Ausformung des Kronendaches

Alle vorstehend beschriebenen örtlichen Frostgefährdungen durch Ausstrahlung können auch durch die Ausformung des Kro-

nendaches entstehen, wenn die tiefsten Punkte einer Bestandsoberfläche nahe am Boden liegen oder stellenweise keine Bestockung vorhanden ist. In diesem Falle sind die Frostbeschädigungen eine Folge der Änderungen des Kronendaches — verursacht durch wirtschaftliche Eingriffe oder durch Naturereignisse. Sehr häufig sind kleinörtliche Frostlagen — Frostlöcher — nicht fest gegeben, sondern sie wurden geschaffen.

Befindet sich das Kronendach mindestens einige Meter über Boden, so treten nur selten Frostbeschädigungen durch Strahlung auf — obwohl die Ausstrahlung an den vielen Zweigen und Nadeln bezw. Blättern groß ist, — weil die Kaltluft nach unten absinkt und sich mit der wärmeren Luft im Stammraum durchmischt oder bei geneigtem Kronendach — ähnlich wie an einem Hang — seitwärts abfließt. Dieser Kaltluftfluß sammelt sich in den Lücken des Bestandes; seine Wirkung wird noch erhöht durch die Ausstrahlung in den Bestandslücken, deren Größe im Vergleich zur Ausstrahlung auf Freiland aus Abb. 1 entnommen werden kann. Hat eine (kreisrunde) Gruppenfläche einen Durchmesser, der gleich der Höhe des umgebenden Bestandes ist, so beläuft sich die Ausstrahlung in der Mitte der Gruppenfläche nur auf etwa $^2/_{10}$ des Freilandwertes. Trotzdem von dem umgebenden Bestand Kaltluft herabströmt und sich auf der Gruppenfläche sammelt, hat eine Gruppenfläche nicht die Eigenschaften eines Frostloches, wenn sich ihr Durchmesser zur Höhe des umgebenden Bestandes wie 1 : 1 verhält.

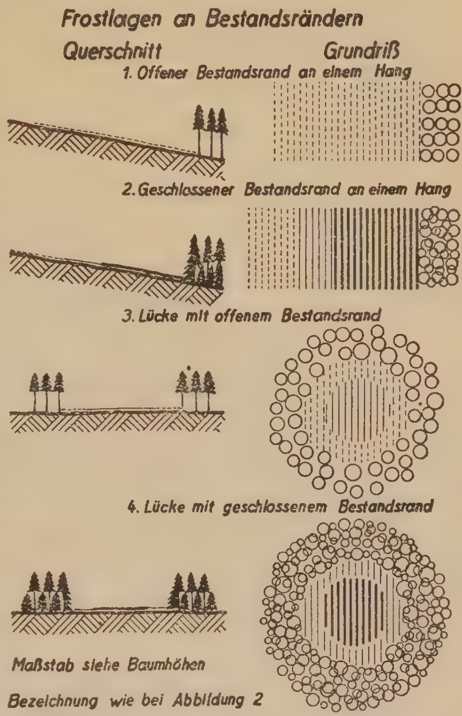


Abb. 3. Vereinfachte Darstellung der Wirkung eines offenen und eines geschlossenen Bestandsrandes auf die Frostgefährdung bei gegebener Geländeausformung

Ganz andere Verhältnisse finden wir in Kulturen: hier kommen vielfach Bestandsmulden vor, die ein solches Verhältnis von 3 bis 10 : 1 aufweisen. Das sind Frostlöcher, die entstanden sind und dann wieder verschwinden — oft erst nach mehreren Jahrzehnten —, wenn die Lücke allmählich von den Seiten her zuwächst oder auf ihr eine frostharte Holzart hochkommt.

Abbildung 3 zeigt einige von den vielen möglichen Beispielen (in vereinfachter Form), wie die Frostgefährdung bei gegebener Bodenausformung von der Bestandsverfassung erhöht bezw. vermindert werden kann. Bei Fall 1 kann die durch Ausstrahlung auf dem unbestockten Hang entstehende Kaltluft ungehindert in den Bestand eindringen, der den Hang abschließt, weil sich die Kaltluft an den einzelnen astfreien Stämmen nicht staut. Die Durchmischung der Kaltluft mit der wärmeren Luft im Stammraum läßt starke Frostgefährdung an keiner Stelle aufkommen. Haben wir dagegen an Stelle des offenen Bestandsrandes von Fall 1 einen dichtgeschlossenen, bis zum Boden reichenden

Bestandsmantel oder ist viel Unterwuchs vorhanden (Fall 2), so wirkt der Altbestand wie eine Talsperre, die Kaltluft wird aufgestaut und trotz des Seitenschutzes des hohen Bestandes ist unmittelbar an ihm angrenzend ein Streifen durch den entstehenden Kaltluft-Stausee stark gefährdet. Ein dichtgeschlossener Bestandsmantel,

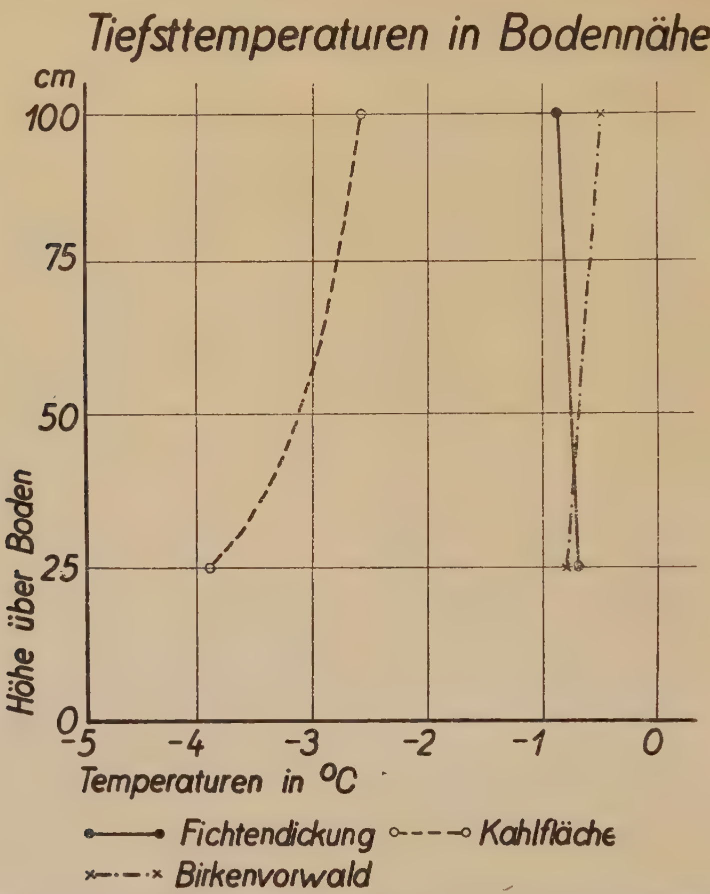


Abb. 4. Durchschnittliche Tiefsttemperaturen in 11 Ausstrahlungsnächten auf den Anzinger Frostflächen bei München

der im allgemeinen eine Reihe von Vorteilen bietet, hat in dem vorliegenden Einzelfall für die hangaufwärts angrenzende Kultur einen Nachteil: Erhöhung der Frostgefährdung.

Bei Fall 3 (Abb. 3) ist zwischen der auf der Gruppenfläche entstehenden und der von dem umgebenden Bestand herabfließenden Kaltluft einerseits und der wärmeren Luft im Stammraum andererseits durch den offenen Bestandsrand Austausch möglich: die Gefährdung ist nicht annähernd so groß wie bei Fall 4; denn dort wird diese Austauschmöglichkeit durch den dichten Bestandsmantel bzw. den vorhandenen Unterwuchs stark gehemmt oder ganz verhindert. Fall 4 zeigt ein ausgesprochenes Bestandsfrostloch.

R. Geiger[13]) und H. Amann[14]) haben eingehende Untersuchungen über die Zusammenhänge zwischen Bodenausformung und Bestandsverhältnisse einerseits und der Frostgefährdung auf der Oberbayerischen Schotterebene andererseits durchgeführt. Neben der Bedeutung ganz seichter Bodeneinsenkungen, die ohne Geräte kaum feststellbar sind, wurde besonders die Frostschutzwirkung eines Birkenvorwaldes gemessen. Auf Abbildung 4 ist die durchschnittliche Tiefsttemperatur aus 11 Frostnächten in 25 und 100 cm über Boden, in einer Fichtendickung, auf einer Kahlfläche und in einem Birkenvorwald nach den Untersuchungen von Amann dargestellt. Während die Kahlfläche stark gefährdet ist und zur Zeit der tiefsten Temperatur einen beträchtlichen Temperaturabfall zwischen 100 und 25 cm über Boden aufweist, bewirken die Fichtendickung und der Birkenvorwald einen sehr wertvollen, in beiden Fällen ungefähr gleichstarken Schutz. Von besonderer Bedeutung ist dabei, daß der Tiefstwert in 25 cm Höhe über Boden in der Fichtendickung um 0,2° C höher und in dem Birkenwald nur um 0,3° C tiefer (gegenüber 1,3° C auf der Kahlfläche) als der entsprechende Wert in 100 cm liegt: die starke Temperaturerniedrigung in unmittelbarer Bodennähe tritt in diesen beiden Fällen nicht auf; dagegen ist sie sehr ausgesprochen auf der Kahlfläche zu finden.

Während bisher besonders die örtlich und kleinörtlich bedingten Frostlagen behandelt wurden, soll nur kurz auf die in Bayern großflächenweise starke Frostgefährdung durch Ausstrahlung hingewiesen werden (z. B. auf der Oberbayerischen Schotterebene). Ausführlich wurden die dort herrschenden Verhältnisse von R. Geiger[13]) und [15]) und K. Rebel[16]) untersucht und dargestellt. Die großflächenweisen Frostbeschädigungen werden hier ebenfalls durch Ausstrahlung verursacht (und nicht durch Kaltluftzufuhr); ihre Bekämpfung wird mit den gleichen Mitteln wie bei den vorhergehend besprochenen Frostgefährdungen durchgeführt; auf die waldbaulich-wirtschaftlichen Maßnahmen wird später eingegangen werden.

Frostgefährdung und Höhenlage

Vom Forstmeteorologischen Institut wurde die Abhängigkeit der Frostgefährdung von der Höhenlage über NN am Großen Arber im Bayerischen Walde in den Jahren 1931 und 1932 eingehend untersucht[17]). Für die dort gegebenen Verhältnisse — die Meßstrecke begann bei 637 m über NN und endete bei 1447 m — hat sich eindeutig ergeben, daß die Spätfrostgefährdung mit der Höhe eher ab- als zunimmt.

Abbildung 5 zeigt die durchschnittlichen Tiefsttemperaturen der 107 Meßpunkte — Beobachtungshöhe durchweg 1,70 m über Bodenoberfläche — und zwar auf der linken Seite die Ergebnisse der 26 untersuchten Ausstrahlungsnächte (kontinentaler Luftkörper) und auf der rechten Seite diejenigen aller beobachteten Fälle (68). Abgesehen von der

---

[13]) R. Geiger, Spätfröste auf den Frostflächen von München. Forstwiss. Zentralbl., 1926, S. 279.

[14]) H. Amann, Birkenvorwald als Schutz gegen Spätfröste. Forstwiss. Centralbl., 1930, S. 493 und S. 581.

[15]) R. Geiger, Das Stationsnetz zur Untersuchung der bodennahen Luftschicht. Deutsch. Met. Jahrbuch f. Bayern, 1923, 1924, 1925, 1926, 1927.

[16]) K. Rebel, Waldbauliches aus Bayern. Band II, S. 59.

[17]) R. Geiger, M. Woelfle und L. Ph. Seip, Höhenlage und Spätfrostgefährdung. Forstwiss. Centralbl., 1933, S. 580 und S. 737; 1934, S. 141, 221, 253, 357 und 465.

starken Streuung der Tiefsttemperaturen ist besonders bemerkenswert, daß in den Ausstrahlungsnächten bei den Tiefsttemperaturen keine nennbare Temperaturabnahme mit der Höhe festzustellen ist, dagegen weisen die unter 700 m über NN liegenden Meßpunkte niedrigere Werte auf als alle anderen zum Teil ganz beträchtlich höher liegenden. Wird noch in Rechnung gestellt, daß das Austreiben der Fichten mit zunehmender Höhe über NN für je 100 m um etwa 3 Tage verzögert wird (wie durch gleichzeitige phänologische Untersuchungen festgestellt wurde), so tritt einwandfrei die Tatsache hervor, daß am Arber des Bayerischen Waldes die Spätfrostgefährdung

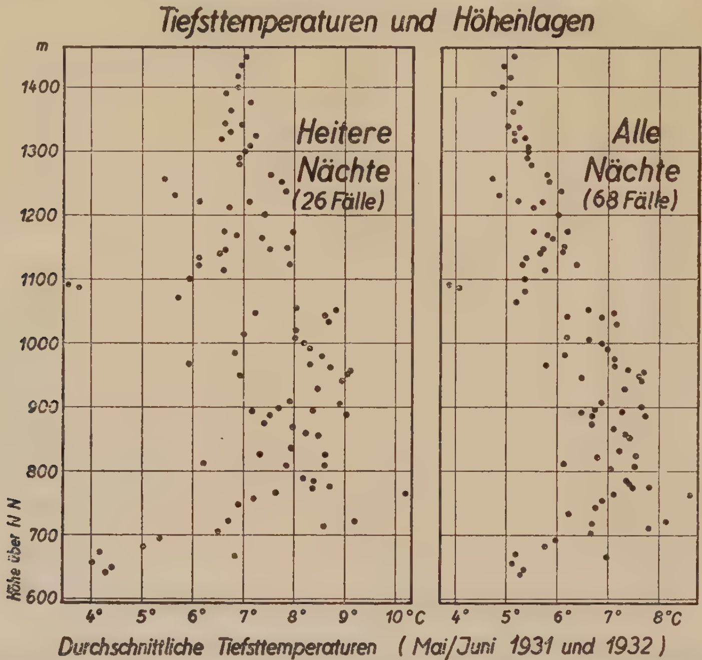


Abb. 5. Durchschnittliche Tiefsttemperaturen in Abhängigkeit von der Höhenlage am Großen Arber im Bayerischen Wald; nördliche und südliche Hanglagen zusammengenommen. (Anm.: Aus R. Geiger, M. Woelfle, L. Ph. Seip, Höhenlage und Spätfrostgefährdung. Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1934, Seite 466, Ab. 1)

mit der Höhe geringer und nicht größer wird. Deutlich tritt auch die warme Hanglage hervor, die bei der gegebenen Geländeausformung um 800 m über NN liegt.

Eine Verallgemeinerung dieses Ergebnisses ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich; alle klein- und mikroklimatischen Sonderverhältnisse jedes einzelnen Meßpunktes gingen nämlich in unsere Beobachtungen ein. Ebenso ist die großräumige Geländeausformung von maßgebendem Einfluß bei unserer Untersuchung gewesen: die Meßpunkte zwischen 600 und 700 m über NN lagen größtenteils in ebenen oder fast ebenen Tallagen und waren damit von vornherein — unabhängig von ihrer Höhenlage — frostgefährdeter als die zwischen 700 und 1447 m über NN liegenden Meßpunkte, die in ihrer überwiegenden Mehrheit auf sanfter oder steiler geneigten Hängen lagen.

Unsere Ergebnisse stimmen mit den Untersuchungen von Knörzer[18]) überein, stehen aber in scheinbarem Widerspruch mit den Forschungen von Münch-Liske[19]) und Pollak[20]). Diese widersprechenden Ergebnisse lassen sich jedoch aus den andersartigen Versuchsgrundlagen und -anordnungen erklären: so sind z. B. die Tiefsttemperaturen nach Angaben der Klimastationen für die Erfassung der Frostgefährdung durch Strahlungsfrost ungeeignet [siehe [15])], ebensowenig können dazu die Tages- oder Monatsmittel der Temperatur aus einer längeren oder kürzeren Reihe verwendet werden. In beiden Fällen geht der häufig ausschlaggebende Einfluß der örtlichen Verhältnisse ganz oder teilweise verloren, und eine Übertragung auf einen anderen gleichhoch liegenden Punkt wird in den meisten Fällen zu Ergebnissen führen, die mit dem Tatbestand in Widerspruch stehen.

Die Zu- bezw. Abnahme der Spätfrostgefährdung mit der Höhe umschließt zwei Fragen, die zweckmäßig völlig getrennt untersucht werden:

1. Von fast rein wissenschaftlicher Bedeutung ist die Größe der Spätfrostgefährdung mit zunehmender Höhe über NN, wenn man die örtlichen und kleinörtlichen Einflüsse durch vollständig gleichartige — nur in ihrer Höhenlage verschiedene — Meßpunkte ausschaltet. Nur große Ebenen bezw. Hochebenen können in diesem Fall die Grundlage für eine Untersuchung liefern; denn sogar an einem vollständig gleichstark geneigten Hang wirken der Kaltluftfluß und damit die örtlichen Bedingungen unter Umständen so stark, daß der Einfluß der Höhenlage verwischt wird. Eine Untersuchung unter den vorgenannten einwandfreien Bedingungen wurde bisher in Deutschland noch nicht durchgeführt, sie dürfte auch auf sehr große Schwierigkeiten in der Auswahl des Versuchsgeländes stoßen; große praktische Bedeutung käme ihren Ergebnissen kaum zu.

2. Von vorzüglich wirtschaftlicher — waldbaulicher Bedeutung ist die Abhängigkeit der Spätfrostgefährdung von der Höhenlage unter Berücksichtigung der tatsächlich vorliegenden Geländeausformung. In Deutschland kommen, von wenigen Ausnahmen abgesehen, (z. B. Teile des Juras und der Schwäbisch-Oberbayerischen Schotterebene) ausgesprochene Hochebenen nicht vor. Der Tatbestand in dem Gelände ergibt meist ebene oder fast ebene Talgründe und daran anschließend mehr oder minder steile Hänge, die durch Höhenrücken oder Kuppen abgeschlossen werden. Während wir in den Tallagen vielfach Frostlagen vorfinden, sind die Hänge und Rücken begünstigt, denn die Kaltluft kann abfließen. Für diese meist gegebenen Verhältnisse nimmt die Frostgefährdung durch Ausstrahlung nicht mit der Höhe zu, sondern sie ist örtlich bedingt: zwischen 650 und 1450 m über NN haben wir in allen Höhenlagen ausgesprochene Frostlagen und ebenso auch ausgesprochene Nichtfrostlagen festgestellt.

Es wird noch eine Reihe von Untersuchungen notwendig sein, um alle Gesetzmäßigkeiten der Frostgefährdung innerhalb Deutschlands so klar herausschälen zu können,

---

[18]) A. Knörzer, Das Auftreten der Frühjahrsfröste in den verschiedenen Teilen Bayerns. Nat. Zeitschrift f. L. u. F., 1905.

[19]) E. Münch und L. Liske, Die Frostgefährdung der Fichte in Sachsen. Tharandter Forstliches Jahrbuch, 1926.

[20]) H. Pollak, Über die räumliche Entwicklung der Spät- und Frühfröste in Norddeutschland. Berlin, 1930.

daß auch die Gefährdungen in nicht besonders untersuchten Gebieten genau erfaßt werden können. Neben dem gerätetechnischen Teil der Untersuchungen (insbesondere den Strahlungsverhältnissen der verwendeten Thermometer) wird große Aufmerksamkeit den klein- und mikroklimatischen Verhältnissen der Meßorte und der Auswirkung dieses Tatbestandes (Aufstellungshöhe der Thermometer; Bodenausformung in näherer und weiterer Umgebung; Art, Dichte und Höhe der Pflanzendecke; Beschaffenheit des Bodens und dessen Feuchtigkeitsverhältnisse usw.) auf die Tiefsttemperaturen und der jeweiligen Wetterlage und deren Vorgeschichte zu widmen sein. Unumgänglich notwendig sind außerdem gleichzeitig vorzunehmende, eingehende phänologische Beobachtungen; denn nicht die Tiefsttemperaturen als solche sind für den Forstmann in diesem Falle von Bedeutung, sondern ihr Zusammentreffen mit der empfindlichen Entwicklungsstufe unserer Forstpflanzen.

Maßnahmen gegen Strahlungsfröste

Wie überall im Waldbau ist auch bei Maßnahmen gegen Forstgefährdung Vorbeugung einfacher und sicherer als Beseitigung des schon vorhandenen Mißstandes. Die vorstehende ausführliche Schilderung der Boden- und Kronendachausformung, die örtlich oder kleinörtlich Frostgefahr mit sich bringt, soll den Wirtschafter in die Lage versetzen, die Gefahr der Frostbeschädigungen zu erkennen, bevor sie auftreten.

Bekämpfung vorhandener Frostgefährdung

Großkahlflächen, auf denen auch nur geringfügige Einsenkungen besonders gefährdet sind, werden durch den Wirtschafter heute in Deutschland nicht mehr geschaffen (sofern der Boden auch weiterhin forstwirtschaftlich genutzt werden soll). Sie können aber durch Naturereignisse entstehen (z. B. durch Nonnenraupenfraß auf der Oberbayerischen Schotterebene in den 90er Jahren). Von wie großer Bedeutung Frostschutzmaßnahmen in solchen Fällen sein können, zeigt die Tatsache, daß im Anzinger Forst — heute, beinahe 50 Jahre nach Entstehung der Kahlflächen — noch kleinere und größere unbestockte Flächen zu finden sind, auf denen durch ständig wiederkehrende Spätfröste die Kulturpflanzen nicht hochkommen; die ersten Kulturmaßnahmen waren im Anzinger Forst in mehrfacher Hinsicht nicht fehlerfrei.

Frostgefährdete Kahlflächen müssen in ihrer ganzen Ausdehnung möglichst sofort nach ihrer Entstehung mit Vorwald bedeckt werden: dabei haben alle anderen Kulturmaßnahmen zurückzutreten. Die Holzartenwahl für den Vorwald und die Möglichkeit, das durch den Vorwald nach einer Reihe von Jahren anfallende schwache Holz verwerten zu können, müssen in ihrer Bedeutung in diesem Fall gegenüber der sofortigen Schaffung irgendeines Vorwaldes zurücktreten. Hat sich auf der Kahlfläche im Laufe einiger Jahre dichter Graswuchs eingestellt oder ist der Vorwald lückig, so entstehen vieljährige Zuwachsverluste, außerdem sind kostspielige Kulturmaßnahmen notwendig, die in keinem Verhältnis zu den Ausgaben für Schaffung eines dichten und gleichmäßigen Vorwaldes stehen.

Wird der Abfluß der Kaltluft durch Bestandsränder verhindert und dadurch der hangaufwärts benachbarte Bestand in einen Kaltluftsee getaucht — gefährdet sind nur Kulturen und Dickungen —, so kann diese Gefahr durch Schaffung von Abflußmöglichkeit beseitigt werden. In den meisten Fällen dürfte mit einem Öffnen des Bestandsrandes, d. h. Aufasten in den untersten 3 bis 5 Metern und Beseitigung des Unterwuchses in der Nähe des Bestandsrandes ein voller Erfolg zu erzielen sein. Soll diese Maßnahme aus irgendwelchen Gründen nicht durchgeführt werden, so genügt auch die Anlage einer Schneise, die vom tiefsten Punkt des Bestandsrandes ausgeht. Die auf diese Art abgeleitete Kaltluft muß auf Freiland oder in den Stammraum eines älteren Bestandes geführt werden — hätte sie die Möglichkeit, eine Kulturfläche oder Dickung zu überfluten, so könnten die Nachteile dort größer sein als die Vorteile im Gebiete des abgelassenen Kaltluftsees.

Durch Gelände- oder Kronendachausformung vorhandene Frostlöcher sollen — sofern sie eine nennenswerte Ausdehnung haben — nicht immer wieder nachgebessert, sondern mit einer als Vorwald gedachten, frostharten Holzart (Ballenpflanzen) weiträumig durchpflanzt werden. Sehr kleine Lücken eignen sich nicht zur Schaffung eines Vorwaldes — namentlich wenn der umgebende Bestand schon einige Meter hoch ist —, weil die meisten als Vorwald besonders geeigneten Holzarten (Birke, Kiefer) lichtbedürftig sind. Nach einigen Jahren kann dann die gewünschte Holzart darunter eingebracht werden, ohne Gefahr zu laufen, weiter durch Frost beschädigt zu werden. Die Kosten für die Schaffung des Schutzholzes und die Zuwachsverluste durch die spätere Einbringung der gewünschten Hauptholzart sind wesentlich geringer als die Ausgaben für die sich fast jährlich wiederholenden Nachbesserungen: außerdem führt der erste Weg fast sicher zum Ziel, während der zweite keinerlei Gewähr für einen Erfolg gibt — es besteht dabei die Gefahr, daß der umgebende Bestand so sehr vorwächst, daß in dem Frostloch überhaupt nichts mehr hochzubringen ist.

Verhinderung der Entstehung von Frostlagen

In frostgefährdeten Gegenden muß sich der Wirtschafter vor Nutzung der Bestände darüber klar sein, auf welchen Flächen durch Bodenausformung oder Kaltluftzufluß nach dem Abtrieb Frostschäden auftreten können; ebenso ist es von Bedeutung, sich über die Wirkung der Kronendachausformung des Alt- und Jungbestandes bei den verschiedenen Verjüngungsverfahren klar zu werden.

Staudacher[21]) hat für eine Anzahl von Einzelfällen die zweckmäßigste Hiebführung für Frostmulden angegeben. — Zur Vermeidung oder Herabminderung von Frostbeschädigungen (durch Strahlungsfrost) gilt für alle Verjüngungsverfahren:

Bei Kaltluftzufluß Belassung des gegen den Zustrom der Kaltluft gerichteten Bestandsrandes und des ganzen darin enthaltenen Unter- und Zwischenstandes und insbesondere des Bestandsmantels bis zur Verjüngung der ganzen gefährdeten Fläche (Jungwuchshöhe etwa 2 m).

Bei Frostlagen durch Geländeausformung Vorausverjüngung der gefährdeten Stellen entweder in kleinen, allmählich größer werdenden Gruppen

---

[21]) Staudacher, Die Frostschäden im Forstbetrieb, deren Ursachen und Bekämpfung. Forstwiss. Centralbl., 1924, S. 1.

(Anfangsdurchmesser nicht größer als die Höhe des umgebenden Bestandes) oder unter Schirm. Hat der Jungwuchs eine Höhe von 3 bis 4 m erlangt oder haben die Gipfel des Jungwuchses die Höhe des die Mulde umgebenden Bodens erreicht, so besteht keine ausgesprochene Gefahr mehr.

Die Frostlagen durch Kronendachausformung erfordern die sorgfältigste Beobachtung, sie sind auch am häufigsten anzutreffen. Grundsätzlich besteht keine Gefahr, wenn die ganze Kulturfläche bestockt ist und die Kultur überall mindestens eine Höhe von 2 m erreicht hat. Bei der Verschiedenartigkeit und Ungleichaltrigkeit des Jungwuchses, die durch fast alle heute angewandten Verjüngungsverfahren bedingt sind, finden sich zwischen den vorgewachsenen Gruppen und Horsten kurz vor Beendigung der Verjüngung häufig unbestockte oder nur mit sehr jungen und niedrigen Pflanzen bedeckte Kleinflächen bzw. Streifen und Bänder. Durch das an den benachbarten vorgewachsenen Jungwuchsteilen ansteigende Kronendach werden diese Einsenkungen in der Bestandsoberfläche zu Frostlagen gemacht. Als einziger Schutz für diese gefährdeten Kleinflächen kommt die Belassung des Altbestandes in Frage und zwar so lange, bis entweder die vorgewachsenen Jungwuchsteile bis auf wenige Meter zusammengelaufen sind oder bis die Bestockung auf diesen Flächen durch künstliche oder natürliche Verjüngung unter Schirm gesichert ist und eine Höhe von mindestens 1 m erreicht hat.

Bei der Anlage eines Vorwaldes ist zu beachten, daß er mit seinen Kronen mindestens 1/3 der zu schützenden Bodenfläche decken muß und vor allem, daß die einzelnen Vorwaldstämmchen gleichmäßig über das ganze zu schützende Gebiet verteilt sind. Ein lückiger Vorwald schützt zwar auf den überstellten Orten vor Frost, er vergrößert aber die Frostgefährdung in den Lücken, d. h. wenn ihr Durchmesser größer als die Höhe des Vorwaldes ist.

Temperaturverteilung

Bedeutung der Hangrichtung und -neigung

Die Verschiedenheit des Klimas in Hanglagen gegenüber Tal- und Höhenlagen ist dem Forstmann längst bekannt; ihr Ausmaß und die dadurch bedingten waldbaulichen Maßnahmen mußten jedoch bis vor kurzem gefühlsmäßig abgeschätzt werden. Th. Künkele und R. Geiger haben in einer Veröffentlichung[22]) auf die große Bedeutung des Hangklimas hingewiesen und eine eingehende Untersuchung eingeleitet. Diese Untersuchung umfaßte Licht-, Wind-, Niederschlag- und Temperaturverhältnisse an dem Bergkegel „Hoher Karpfen" bei Spaichingen in Württemberg[23]). Nachfolgend wird zunächst nur die Temperaturverteilung auf dem das umgebende Gelände rund 100 Meter überragenden Kegel behandelt.

Der Einfluß des auf dem Jurakegel vorhandenen Pflanzenwuchses machte sich bei den in 25, 100 und etwa 200 cm Höhe über Boden vorgenommenen Temperaturmessungen stark geltend. Wir betrachten also nicht nur die durch Hangneigung und

---

[22]) Th. Künkele und R. Geiger, Hangrichtung und Pflanzenklima. Forstwiss. Centralbl., 1925, S. 597.

[23]) R. Geiger, Messung des Expositionsklimas. Forstw. Centralbl., 1927, S. 665, 853 und 914; 1928, S. 73, 437 und 633; 1929, S. 38, 305 und 637.

Hangrichtung abgewandelten Temperaturen, sondern auch noch die damit verkoppelte Wirkung des verschiedenartigen Pflanzenwuchses. Da jedoch der Pflanzenwuchs den natürlichen Wuchsverhältnissen bei der gegebenen Geländeausformung entsprach (Süd- und Südwestlagen fast frei von Holzgewächsen), muß der Einfluß des verschiedenartigen Pflanzenwuchses nicht als Störung, sondern als naturgegebene Bedingung eingesetzt werden.

Die Temperaturunterschiede in den einzelnen Hanglagen untereinander sind um so größer je stärker die Sonneneinstrahlung ist, d. h. je wolkenfreier der Himmel, je größer der Einfallswinkel und je länger die Sonnenscheindauer. Aus der *einen* vorliegenden Untersuchung können natürlich keine genauen *zahlenmäßigen* Temperaturunterschiede für beliebige Hangneigungen und -richtungen abgeleitet werden, aber es ist möglich, die grundsätzlichen Temperaturabwandlungen nach Hang-

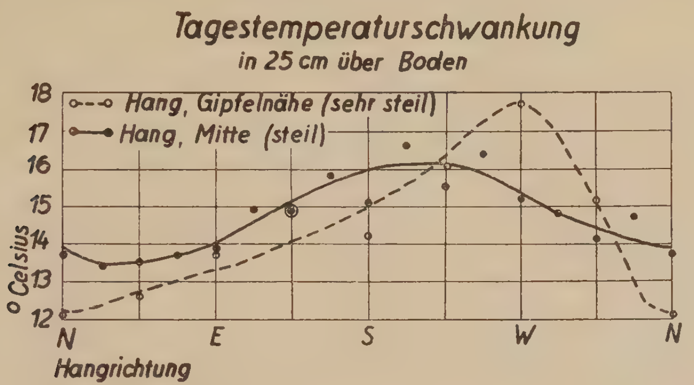


Abb. 6. Durchschnittliche tägliche Schwankung der Lufttemperatur (17 heitere Tage der Wachstumszeit) am Hohen Karpfen bei Spaichingen (Württ.) in Abhängigkeit von der Hangrichtung

richtung und -neigung festzulegen. *Mit zunehmender Steilheit vergrößern sich die Temperaturunterschiede in den einzelnen Hangrichtungen.* Da die genannten Messungen nur bis zu einem Geländeneigungswinkel von 35 Grad gehen, kann über die Größe der Abwandlung der Temperaturverteilung an noch steileren Hängen nichts gesagt werden (Hänge mit einem Neigungswinkel von mehr als 35 Grad kommen in größerer Ausdehnung als Holzbodenfläche nur im Hochgebirge vor, für die Forstwirtschaft im Flachland oder Mittelgebirge sind sie deshalb ohne Bedeutung).

Auf Abbildung 6 ist die tägliche Temperaturschwankung der Lufttemperatur in 25 cm Höhe über Boden (Mittel aus 17 heiteren Tagen der Wachstumszeit) je nach Hangrichtung für zwei verschiedene Höhenschichtlinien eingetragen. Wir ersehen daraus, daß die Tagesschwankungen am Nord- bis Osthang am geringsten und am Süd- bis Westhang am größten ist. Die größte Schwankung finden wir am Westhang des sehr steilen, oberen Kegelteiles, während der mittlere, etwas weniger steile Teil des Kegels seinen Schwankungshöchstwert im Südwesten aufweist. Der Höchstwert der Schwankung an dem sehr steilen Hangteil ist beträchtlich größer als der Höchstwert an dem weniger steilen Mittelteil des Kegels. Fassen wir zusammen, so ergibt sich *an den*

Süd- und Westhängen an heiteren Tagen ein Temperaturgang mit viel größeren Schwankungen als an den nördlichen und östlichen Hangrichtungen. Je größer die Bedeckung des Himmels, desto geringer die Temperaturschwankungen der einzelnen Hangrichtungen: bei vollständig bedecktem Himmel wird die Temperatur von der Hangrichtung nicht mehr nennenswert beeinflußt.

Die große Temperaturschwankung an Süd- und Westhängen an heiteren Tagen wird durch die beträchtliche Sonneneinstrahlung bewirkt, während die kleine Schwankung der Nord- und Ostlagen ihre Ursachen in der geringen Stärke der Sonneneinstrahlung auf diesen Hangrichtungen hat (in Ostlagen wird die Einstrahlung nicht so wirksam wie in den Westlagen, weil am Morgen ein Großteil der Sonnenstrahlung zur Verdampfung des Taus aufgebraucht wird und deshalb nicht zur Temperaturerhöhung der Luft beiträgt). Zur Zeit der Tiefsttemperatur ist der Unterschied der Lufttemperatur in den verschiedenen Hangrichtungen viel geringer als zur Zeit der Höchsttemperatur (nur heitere Tage); im Durchschnitt beträgt er nur die Hälfte oder weniger.

Für den Forstmann ist besonders die starke Erwärmung der Luft an heiteren Tagen an Süd- und Westhängen von Bedeutung; am Ende des nächsten Abschnittes werden wir auf die waldbaulichen Maßnahmen zurückkommen, die durch diese Tatsache veranlaßt sind.

Sehr eindrucksvoll hat C. Troll[24]) den Einfluß der Hangrichtung geschildert: „Stärker als ich es in irgendeinem anderen Gebirge der Erde, mit Ausnahme der Drakensberge in Südafrika, angetroffen habe, ist das Leben am Nanga Parbat von der Exposition zur Sonne abhängig. Die feuchten Pflanzenbestände — feuchter Nadelwald, Birkengehölze, Weidengebüsche und Alpenrosengesträuch — kommen überhaupt fast ausschließlich in Schattenlage vor."

Im vorstehenden mußten wir uns auf die Darstellung der Tagestemperaturschwankung, d. h. des Unterschiedes der Höchst- und Tiefstwerte, beschränken, weil laufende Dauerbeobachtungen der Lufttemperatur in genügender Anzahl am Hohen Karpfen nicht gewonnen wurden. Von noch größerer Bedeutung wären Dauerbeobachtungen der Temperatur der obersten Bodenschicht (etwa 1 bis 2 cm unter der Oberfläche) bei verschiedenen Hangneigungen und -richtungen, aber auch Messungen hierüber wurden seinerzeit nicht durchgeführt. Die Bodentemperaturen der obersten Schicht dürften einen ähnlichen Gang aufweisen wie die beschriebene Lufttemperatur in 25 cm über Boden, nur sind die Unterschiede der Höchst- und Tiefstwerte nach Hanglage und -richtung ganz beträchtlich größer.

Temperatur und Bestandsaufbau

Obwohl eine sehr große Zahl von Temperaturmessungen im Walde im forstlichen Schrifttum niedergelegt ist — in den meisten Fällen sollten die Unterschiede der Temperaturverhältnisse im Walde gegenüber Freiland festgestellt werden — besitzen wir nur wenige für den Forstmann brauchbare diesbezügliche Temperaturangaben, d. h. Ergebnisse, die von ihm bei waldbaulichen Maßnahmen berücksichtigt werden können und sollen. Dieser an sich bedauerliche Tatbestand hat vor allem zwei Ursachen:

---

[24]) Carl Troll, Der Nanga Parbat als Ziel deutscher Forschung. Zeitschr. der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, März 1938, S. 1.

1. Die Art der verwendeten, verschiedenen Meßgeräte und die unterschiedliche Versuchsanordnung haben Ergebnisse gezeitigt, die größtenteils unter sich nicht verglichen werden können. Von strahlungsfreien Temperaturen (Lufttemperaturen) angefangen liegen Messungen in allen Stufen bis zu nahezu reinen Strahlungstemperaturen vor; da der Anteil der Strahlung fast in keinem Fall genau bestimmt wurde, ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zu einem einheitlichen Bild nicht möglich und nicht zulässig.

2. Der Einfluß der Witterung während der meist kurzfristigen Untersuchungen (kurzfristig im Vergleich zur Umtriebszeit) und die Verschiedenartigkeit der untersuchten Bestände (einschließlich aller Standortsfaktoren) wurde meist nicht so klar umrissen, daß eine Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf andere Verhältnisse einwandfrei möglich wäre.

Obwohl schon viele Temperaturmessungen im Walde vorliegen, hat der Forstmeteorologe auf diesem Gebiet noch ein reiches und erfolgversprechendes Arbeitsfeld. Nur zwei Wege können dabei beschritten werden: entweder Messung der wahren Lufttemperatur (mit kleinen strahlungsfreien Thermoelementen bzw. strahlungsfreien elektrischen Widerstandsthermometern) oder Bestimmung der strahlungsbeeinflußten Temperatur der Nadeln und Blätter. Alle zwischen diesen beiden „Grenz“messungen der Temperatur liegenden Untersuchungen (Strahlungsschutz der verschiedensten Art für die Temperaturmeßgeräte bzw. frei ausgesetzte, strahlungsempfindliche Thermometer) werden nicht zu einwandfreien, allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten der Temperaturverhältnisse im Walde führen.

Vom Forstmeteorologischen Institut wurden zwei große Untersuchungen auf diesem Gebiet durchgeführt[25])[26]). Die vorstehend gemachten Einwände gelten für diese beiden Untersuchungen nicht, obwohl auch hier weder die wahre Lufttemperatur noch die strahlungsbeeinflußte Temperatur der Nadeln und Blätter gemessen wurde, weil die beiden Untersuchungen nur eine Sonderfrage lösen sollten: neben den anderen Klimaeinzelkräften waren die Unterschiede in der Temperaturverteilung zwischen einem einschichtig aufgebauten Bestand (Kiefern bzw. Eichenreinbestand) gegenüber denjenigen in einem zweischichtigen Bestand (Kiefern mit Fichtenunterstand bzw. Eichen mit Buchenunterstand) festzustellen. Diese Aufgabe haben die Messungen auch für die untersuchten Bestände gelöst; eine Übertragung der Ergebnisse in dieser Einzelfrage auf ähnlich gelagerte Verhältnisse ist auch zulässig. Dagegen kann aus den beiden genannten Untersuchungen nicht die wahre Temperaturverteilung in irgendwie beschaffenen Beständen — auch nicht für die untersuchten — entnommen werden. Aus diesem Grunde ergeben sich für den Wirtschafter auch aus den genannten Untersuchungen nur insoweit Folgerungen, wie wir die Unterschiede der Temperaturverteilung in einem einschichtigen Bestand gegenüber denen in einem zweischichtigen kennen, nicht dagegen die Temperaturverteilung als solche in den beiden Beständen.

Sowohl Holzart als auch die Versuchsanordnung war bei beiden Untersuchungen grundverschieden: im ersten Fall [siehe [25])] wurden die Temperaturverhältnisse in einem Kiefernreinbestand gegenüber einem Kiefernbestand mit Fichtenunter- und -zwischen-

---

[25]) R. Geiger, Untersuchungen über das Bestandsklima. Forstwiss. Centralbl., 1925, s. S. 629 und 848; 1926, S. 337, 495, 523 und 749.

[26]) R. Geiger und H. Amann, Forstmeteorologische Messungen in einem Eichenbestand. Forstwiss. Centralbl., 1931, S. 237, 341, 705 und 809; 1932, S. 371.

stand mit Thermographen untersucht, im zweiten [siehe [26])] diejenigen in einem Eichenreinbestand gegenüber einem Eichenbestand mit Buchenunterstand mit Alkoholthermometern und Thermoelementen; trotzdem sind die Ergebnisse in beiden Fällen wesensgleich.

Sieht man von Einzelheiten und Feinheiten ab, so ergibt sich mit allgemeiner Gültigkeit: ein Bestand mit Unterstand weist gegenüber einem vergleichbaren Bestand ohne Unterstand in bezug auf die Temperaturen in Bodennähe folgende Unterschiede in der Wachstumszeit auf:

1. höhere Tiefsttemperaturen;
2. niedrigere Höchsttemperaturen;
3. geringere aperiodische Temperaturschwankungen (Temperaturunruhe);
4. verspätetes Eintreten und geringeres Ausmaß aller Temperaturänderungen, die durch Witterungsereignisse ausgelöst werden.

Wir finden in einem Bestand mit Unterstand in Bodennähe einen „gedämpfen" Temperaturgang im Vergleich zu demjenigen in einem Bestand ohne Unterstand; dies gilt für den Tages- wie für den Jahresgang.

Die Ergebnisse der Temperaturverteilung im Stamm- und Kronenraum, die in beiden Untersuchungen eingehend bearbeitet wurden, werden nicht besprochen, weil durch sie keine waldbaulichen Maßnahmen veranlaßt erscheinen.

Wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund der Temperaturverteilung am Hang und in Beständen mit verschiedenem Aufbau

Waldbauliche Maßnahmen können nur in Einzelfällen auf die gegebenen oder die zu erzielenden Temperaturverhältnisse allein aufgebaut werden; bei der großen Mehrzahl wirtschaftlicher Planungen im Walde müssen — vom meteorologischen Standpunkt aus — auch Licht-, Wind-, Feuchtigkeits- und Niederschlagsverhältnisse berücksichtigt werden. Unter bestimmten Umständen ist es allerdings möglich, daß nur eine dieser Einzelkräfte — unter Zurücksetzung aller anderen — bestimmend für die Maßnahmen des Forstmannes ist oder sein sollte. Die den Wuchs und die Verjüngung am meisten hemmende meteorologische Einzelkraft muß unter Zurückstellung anderer Erwägungen so abgewandelt werden, daß die Hemmungen möglichst behoben werden. Es gibt Fälle, in denen die Temperaturverhältnisse — meist in Verbindung mit den Feuchtigkeitsbedingungen — ausschlaggebend für das Gedeihen und Fortkommen des Waldes sind.

Trotz der Vielgestaltigkeit der meteorologischen, klimatologischen, geologischen und bodenkundlichen Verhältnisse und der Ansprüche unserer Waldbäume ergeben sich einzelne, fast für alle Fälle geltende Grundsätze im Waldbau. **Die Deckung des Bodens gegen die ungehinderte Sonneneinstrahlung, die ungestörte Ausstrahlung und den freien Zutritt des Windes gehört zu den Grundregeln jeder planmäßigen Waldwirtschaft** (für die Verhältnisse in Deutschland). Dabei scheiden als Bodendeckung aus: starke Rohhumusschichten, dichter verfilzter Überzug von Moos, Heide, Beerkräutern, Seegras usw. Nur Überstellung des Bodens mit bodenschützenden Holzgewächsen, forstlichen

Hilfspflanzen oder künstliche Bedeckung (mulchieren) kommen als günstig wirkende Maßnahmen in Frage. Nicht nur die Temperaturhöchst- und -tiefstwerte und die Windwirkungen werden auf diese Weise abgeschwächt, sondern auch die Feuchtigkeitsverhältnisse wesentlich gebessert. Daß unter bestimmten Bedingungen (starke Rohhumuslage — sogenannte organische Weichböden —, Einleitung und Durchführung von Naturverjüngung) der obengenannte Grundsatz durchbrochen werden muß, ändert nichts an der Tatsache seiner Gültigkeit bei den weitaus meisten waldbaulichen Maßnahmen.

Am Ende der ganzen Abhandlung wird anläßlich der Behandlung der Verdunstungsfragen ausführlich auf die Bedeutung der Bodendeckung eingegangen werden, aber schon hier soll auf eine Arbeit verwiesen werden[27]), die dem Forstmann Mittel in die Hand gibt, große, bisher ertragsarme oder ertragslose Waldflächen unter Umständen in gute Bestockung zu bringen. Die meteorologischen Verhältnisse der Bodendeckung mit Pflanzenstoffen wurden bisher noch nicht eingehend untersucht, aber trotzdem läßt sich sagen, daß durch diese Maßnahmen die wuchshemmenden und -hindernden meteorologischen Höchst- und Tiefstwerte (Überhitzung und starke Abkühlung, Austrocknung und Überschwemmung) stark gemildert werden. Die „tätige" Oberfläche mit ihren großen Schwankungen der meteorologischen Einzelkräfte wird nicht mehr durch die Bodenoberfläche gebildet, sondern durch die oberste Lage der Bodendeckung: die Bodenoberfläche genießt dadurch ein abgewandeltes, „gedämpftes" Mikroklima, das die Wuchsbedingungen für jedes Pflanzenfortkommen verbessert.

Zeitlich und örtlich vollkommene Bodendeckung muß vor allem dort durchgeführt werden, wo kürzere oder längere Hitzezeiten — dies sind zumeist Trockenzeiten — häufig oder regelmäßig auftreten oder wo die Sonneneinstrahlung durch Hangrichtung und Hangneigung (Süd- und Westlagen) besonders wirksam ist. Ebenso wichtig ist die Durchführung der Bodendeckung in *durchschnittlich* trockenen und heißen Gebieten. *Die wünschenswerte Deckung des Bodens wird von mehrschichtigem Hochwald nennenswert besser vollzogen als von einschichtigem.*

Als Maßnahmen im einzelnen kommen in Betracht:

1. Schaffung und Erhaltung eines mehrschichtigen Bestandes (wenn einschichtiger nicht zu umgehen, dann Unterbau);
2. langsame Verjüngung (notfalls künstliche Verjüngung unter Schirm) und Abräumung des Altholzes erst zu einem Zeitpunkt, zu welchem der Jungwuchs den Boden schon genügend deckt (Höhe 1 bis 2 m);
3. Übernahme des Unterstandes in die Verjüngung, soweit und solange er zur Bodendeckung notwendig ist;
4. Bedeckung von besonders gefährdetem Boden mit Steinen oder toten Pflanzen, notfalls mit Schlagabraum (mulchieren).

Die unter 2 und 3 genannten Mittel werden zwangsläufig zu Fällungs- und Bringungsschäden und zu Bringungsschwierigkeiten führen. Der Wirtschafter muß örtlich entscheiden, ob diese Nachteile nicht durch die zu erwartenden Vorteile (Steigerung der Wuchsleistung) überwogen oder durch andere Maßnahmen verringert werden können (dichteres Wegenetz, Aushaltung von Blochholz, Verwendung von Rückegeräten usw.). Vielfach wird dies möglich und notwendig sein, es soll nur an die zahlreichen ver-

[27]) L. *Fabricius*, Bodendeckung mit Pflanzenstoffen. Forstwiss. Centralbl., 1938, S. 1.

hagerten und ausgebrannten Süd- und Westhänge erinnert werden, die in hügeligem Gelände meist dann zu finden sind, wenn der Boden freigelegt wurde.

In diesem Zusammenhang soll ganz kurz eine Untersuchung aus Anlaß eines Schadenersatzstreites wegen Waldbrand erwähnt werden, die sich mit der Entzündung der Streudecke beschäftigt[28]). Es hat sich dabei gezeigt, daß auch unter den günstigsten Strahlungsverhältnissen keine Brandgefahr durch farbige Flaschen oder Flaschenteile besteht. In dem farbigen Glas wird ein Großteil der Sonnenstrahlung verschluckt und die einzelnen Flaschenscherben (insbesondere auch der Flaschenboden) weisen außerdem eine so ungünstige „Brennglasform" auf, daß die durchgehenden Strahlen nicht zu einem Brenn*punkt*, sondern nur zu Brenn*flächen* und Brenn*linien* vereinigt werden; die Temperaturerhöhung auf diesen Brennflächen ist nur gering. Selbst farbloses Glas (in Form der handelsüblichen Gebrauchsflaschen) dürfte in unseren Breiten auch unter den ungünstigsten Verhältnissen nie die mittelbare Ursache für Waldbrände sein.

---

[28]) R. *Geiger*, Können herumliegende Bierflaschen einen Waldbrand verursachen? Forstwiss. Centralbl., 1933, S. 523.

III. Licht

Durchschnittliche Tageslichtmengen

Bei den im Institut durchgeführten Lichtmessungen wurden durchwegs Eder-Hechtsche Graukeilphotometer verwendet. Mit diesen Geräten läßt sich die einfallende Lichtmenge (Sonnenstrahlung + Himmelsstrahlung) in einem bestimmten Zeitabschnitt als Summe messen, und zwar wird nur Licht mit einer Wellenlänge von etwa 360 bis 440 μμ aufgezeichnet. Diese Wellenlänge entspricht dem kurzwelligen Bereich der sichtbaren Sonnenstrahlung. Den auf photochemischem Wege arbeitenden Geräten — zur Aufzeichnung wird lichtempfindliches Papier verwendet, das an sonnigen Tagen mindestens einmal täglich erneuert werden muß —, haften eine Anzahl von Mängeln an, die bei Beurteilung aller mit diesen Geräten vorgenommenen Lichtmessungen beachtet werden müssen:

1. Es wird nur Licht von einer bestimmten Wellenlänge, und zwar nicht der assimilatorisch, sondern der photographisch wirksame Anteil aufgezeichnet;
2. die Angaben der einzelnen Photometer weichen unter sich stark voneinander ab;
3. die Bedienung und Auswertung muß sehr sorgfältig vorgenommen werden, und auch dann ergeben sich noch Ungenauigkeiten;
4. sie eignen sich nicht zu Absolutmessungen, sondern nur zu Vergleichsmessungen.

Unter Betonung der vorgenannten Mängel werden die Ergebnisse der Lichtmessungen bei Geländeneigung und in Beständen mit verschiedenem Aufbau dargelegt; sie sollen nur einen Überblick im großen geben und sie sind nicht geeignet, mit Absolutwerten, die bei anderen Untersuchungen gewonnen wurden, verglichen zu werden. Immerhin gestatten sie die Vergleichbarkeit untereinander und bieten dem Forstmann einen gewissen Anhalt für die verhältnismäßigen Unterschiede.

Bedeutung der Hangrichtung

Am „Hohen Karpfen" wurden vom Mai bis mit September 1926 von R. Geiger Lichtmessungen mit Graukeilphotometern durchgeführt [siehe [23])]. An dem steilen Bergkegel waren 8 Photometer nach der Windrose angeordnet, sämtliche unter einer Neigung von 35 Grad. In Abbildung 7 sind die Ergebnisse dargestellt; als Maßstab wurde diejenige Lichtmenge gewählt, die das Photometer mit Südneigung an wolkenlosen Tagen aufzeichnete (= 100 %). Die Gesamtaufnahme wurde in 4 Bewölkungsgrade unterteilt; die Anzahl der Meßtage für jeden Bewölkungsgrad, aus denen die Mittel vorstehend dargestellt sind, beträgt zwischen 14 und 26. Die Schaulinien der Lichtmengen (Sonnen- und Himmelsstrahlung) verlaufen ungefähr spiegelbildlich zur Südlinie — ein Ergebnis, das zu erwarten war, wenn von Störungen der Sonneneinstrahlung (wechselnde Bewölkung, zunehmende Trübung der Luft gegen Nachmittag und Abend) abgesehen wird. Der Höchstwert der gemessenen Lichtmenge liegt jeweils bei dem nach Süden

geneigten Photometer, doch genießen auch die nach Südwesten und Südosten liegenden noch fast denselben Betrag. Je mehr wir auf die Nordhälfte des Bergkegels kommen, desto geringer ist die im Laufe eines Tages gespendete Lichtmenge.

Die bei heiterem Wetter großen Unterschiede werden mit zunehmender Bewölkung geringer und verschwinden bei ganz bedecktem Himmel vollständig. Diese Erscheinung haben wir auch bei der Temperaturverteilung gefunden, wie überhaupt der Gang der Temperatur und der Lichtmenge bei verschiedenen Hangrichtungen in vielen Punkten gut übereinstimmten. Ein wesentlicher Unterschied ist nur bei der Hangrichtung, auf der der Höchstwert zu finden ist, festzustellen: bei der Temperatur auf der südwestlichen und westlichen, bei dem Licht auf der südlichen Neigung.

Die geschilderten Messungen wurden bei einer Neigung der Meßgeräte von 35 Grad durchgeführt; wird die Neigung geringer, so verkleinern sich auch die Unterschiede der Lichtmengen der einzelnen Hangrichtungen, bei waagerechtem Boden werden sie gleich

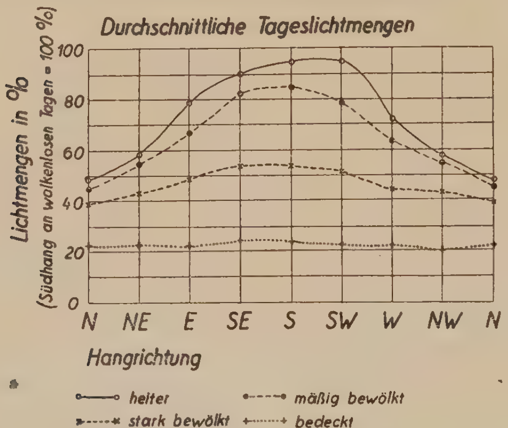


Abb. 7. Verhältnis der durchschnittlichen Tageslichtmengen bei einer Hangneigung von 35 Grad in Abhängigkeit von der Hangrichtung (im Mai bis mit September). (Die Lage des Höchstwertes der Strahlung an heiteren Tagen im Südwesten des Hanges ist nicht gesetzmäßig bedingt, sondern eine Folge der Zufälligkeiten innerhalb des Beobachtungszeitraumes und der Gerätefehler.)

Null. — Als Gesamtheit gesehen erhält ein Bergkegel eine größere Lichtmenge zugestrahlt als eine waagerechte Fläche von der Größe des Berggrundrisses, weil er bei tiefstehender Sonne Strahlung abfängt, die bei waagerechtem Gelände auf den benachbarten Boden auftreffen würde. Besonders begünstigt sind durch dieses Abfangen die östlichen und westlichen Hangrichtungen, denn sie werden am meisten von der tiefstehenden Sonne getroffen.

Bedeutung des Bestandsaufbaus

R. Geiger und H. Amann [siehe [26]] haben in den Jahren 1928 und 1929 Lichtmessungen in den Eichenbeständen bei Schweinfurt mit den Eder-Hechtschen Graukeilphotometern vorgenommen, und zwar wurde in Altbeständen ohne bzw. mit Buchenunterstand jeweils über den Kronen (26 bis 27 m über Boden) und in etwa 3 m Höhe über Boden gemessen. Dabei hat sich gezeigt, daß in 3 m Höhe bei unbelaubtem Zustand in dem reinen Eichenbestand 54 % und in dem Eichen-Buchenbestand 44 % derjenigen Lichtmenge zu finden ist, die über dem reinen Eichenbestand einstrahlt. Bei vollentwickeltem Laub (Messungen im Herbst) wurden dagegen nur 8 % (im Eichenreinbestand) bzw. 3 % (im Eichen-Buchenbestand) in 3 m Höhe über Boden gemessen. Rund zwei Drittel des Lichtes, das in einem Eichenreinbestand den Boden trifft, wird

demnach von dem Buchenunterstand in der Wachstumszeit abgefangen. — Ausführlich kann auf die Lichtverhältnisse in verschieden aufgebauten Beständen nicht eingegangen werden, weil keine Institutsuntersuchungen darüber vorliegen und bei der Schwierigkeit der Strahlungsmessungen der einzelnen Wellenbereiche (Dauerbeobachtungen) allgemeingültige Untersuchungen auch von anderer Seite nicht vorliegen.

Die bekannte Tatsache, daß unterständige Buchen im Frühjahr um einige Tage früher ergrünen als vergleichbare hauptständige, soll schon hier erörtert werden. Die im Frühjahr dem Kronenraum vor der Belaubung durch Sonnenstrahlung zugeführte Wärme wird bei hauptständigen Buchen durch den leichter eingreifenden Wind rascher weggeführt als bei unterständigen, denn dort verhindern die Äste und Zweige der hauptständigen Stämme ein stärkeres Durchgreifen des Windes bis in den Kronenraum der Buchen. Bei Nacht dagegen schützen die hauptständigen Bäume die unterständigen Buchen vor starker Ausstrahlung. Der Kronenraum unterständiger Buchen ist deshalb im Frühjahr an klaren Tagen vor Laubausbruch bei Tag unter Umständen und bei Nacht immer wärmer als der Kronenraum gleichartiger hauptständiger Buchen. Außerdem sprechen unterständige Buchen, die während der Belaubung fast ständig im Schatten oder Halbschatten stehen, auf die Sonnen- und Himmelsstrahlung vor dem Laubausbruch stärker und rascher an als hauptständige Buchen, die der freien Sonnenstrahlung immer ausgesetzt sind. A. Engler hat in einer ausführlichen Untersuchung das frühere Austreiben der Schattenknospen festgestellt[29]). Auch freistehende ältere Buchen ergrünen von unten nach oben, entsprechend der Erwärmung der Luft, die bei heiterem Wetter vom Boden ausgeht.

Wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund der Lichtmessungen am Hang und in Beständen mit verschiedenem Aufbau

Die Sonnenstrahlung wirkt auf die Pflanzen in zweifacher Weise: 1. als Licht, das zur Assimilation notwendig ist und 2. als Wärme; die die Pflanzen treffende Strahlung wird zu einem großen Teil in Wärme umgewandelt; ein kleiner Teil durchdringt die Blätter und 4,5 bis 9 % werden zurückgestrahlt (nach V. Conrad)[30]). Die aufgenommene (absorbierte) Strahlung trägt zur Erhöhung der Temperatur bei. Licht- und Wärmewirkung der Sonnenstrahlung müssen getrennt betrachtet werden, obwohl sie weitgehend miteinander verkoppelt sind.

Licht als solches wird nie in einer Menge zugestrahlt, daß es für unsere Waldbäume schädlich, d. h. wuchshemmend, wirken würde. Sehr oft tritt dagegen Lichtmangel auf, insbesondere bei Verjüngungen unter Schirm. L. Fabricius hat in einigen großangelegten Versuchen festgestellt[31]), in welchem Maße das Kümmern der

[29]) A. Engler, Untersuchungen über den Blattausbruch und das sonstige Verhalten von Schatten- und Lichtpflanzen der Buche und einiger anderer Laubhölzer. Mitteilungen der Schweizerisch. Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, Band X, Heft 2, S. 107.

[30]) V. Konrad in Handbuch der Klimatologie von W. Köppen und R. Geiger, Band I, Teil B, S. 23.

[31]) L. Fabricius, Der Einfluß des Wurzelwettbewerbes des Schirmbestandes auf die Entwicklung des Jungwuchses. Forstwiss. Centralbl. 1927, S. 329.

— Neue Versuche zur Feststellung des Einflusses von Wurzelwettbewerb und Lichtentzug des Schirmstandes auf den Jungwuchs. Forstwiss. Centralbl., 1929, S. 477.

— Was entscheidet über Ankommen und Fußfassen der natürlichen Verjüngung unter Schirm? Forstwiss. Centralbl., 1935, S. 11.

Verjüngungen unter Schirm durch Lichtmangel und durch den Wurzelwettbewerb des Altbestandes verursacht wird. Licht- und Feuchtigkeitsmangel wirken in diesem Falle zusammen, um das Gedeihen der Verjüngung zu hemmen oder zu verhindern, wobei diejenige der beiden Einzelkräfte die Hauptursache sein wird, die das Mindestbedürfnis des Jungwuchses nicht deckt. Die Abhängigkeit der eingestrahlten Lichtmenge von der Hangrichtung und Hangneigung wurde dargelegt; daraus ergibt sich, daß unter sonst gleichen Bedingungen der Schirm um so lockerer sein muß, je mehr die Hangrichtung nach Norden übergeht und je steiler der Hang dabei gleichzeitig wird. *Während auf einem Südhang eine geringe Auflockerung des Bestandsschlusses genügen kann, um der Verjüngung das notwendige Licht zukommen zu lassen, müssen die Eingriffe auf dem Nordhang viel kräftiger sein, um das gleiche Ziel zu erreichen.* Ost- und Westhang sind Übergangsglieder.

Ähnlich wie Süd- und Nordlage wirkt ein Bestand ohne und mit Unterstand. Der Unterstand nimmt einen Großteil des Lichtes auf, das durch die Kronen des Hauptbestandes dringt. Die Lichtmenge, die bis zum Boden durchdringt — und nur diese steht der Verjüngung zur Verfügung —, ist deshalb sehr gering. Waldbaulich muß sich diese Überlegung so auswirken, daß in einem mehrschichtigen Bestand der Schlußgrad des Hauptbestandes viel lockerer sein muß als in einem einschichtigen, wenn auf den Boden die gleiche Lichtmenge treffen soll. *Da es in vielen Fällen nicht zweckmäßig ist, den Unter- und Zwischenstand bei Einleitung der Verjüngung zu entnehmen — namentlich dann nicht, wenn Feuchtigkeitsmangel herrscht —, müssen die Eingriffe in den Hauptbestand um so kräftiger sein, je mehr Unterstand vorhanden ist.* Ist sehr dichter Unter- und Zwischenstand vorhanden, so kann und muß zur notwendigen Lichtstellung auch ein Teil davon entnommen werden; es soll nur auf alle Fälle vermieden werden, daß er größtenteils oder ganz entfernt wird; unter Umständen kann auch durch Aufastung des Unterstandes dem Licht Zutritt zum Boden verschafft werden. Die Entfernung des Unterstandes zur Verringerung der Verdunstung, wie sie von v. Kalitsch empfohlen wird, dürfte nur unter der Voraussetzung zweckmäßig sein, daß der Boden genügend gedeckt ist oder daß der Wärmemangel größer als der Feuchtigkeitsmangel ist. Bei ungedecktem Boden wirken Wind und Strahlung bei Entfernung des Unterstandes auf die Bodenoberfläche ein, die Verdunstung wird dadurch wesentlich erhöht und kann eine Vermehrung erfahren, die größer ist als der Wasserverbrauch des Unterstandes.

Die von Pflanzen und Boden aufgenommene Sonnenstrahlung, die in Wärme umgewandelt wird, erhöht nicht nur die Temperatur und den Luftaustausch (Konvektion), sondern dadurch auch die Verdunstung. Ist genügend Feuchtigkeit vorhanden, so ist die durch Strahlung bewirkte Temperaturerhöhung der Pflanzenteile im allgemeinen nur vorteilhaft, denn der Ablauf der Lebensvorgänge wird hierdurch beschleunigt. Schäden durch Überhitzung, die *nur durch die Besonnung der Pflanzenteile* verursacht werden, treten in unseren Breiten verhältnismäßig selten auf (Rindenbrand). Das Keimlingssterben durch Überhitzung (Münch) wird nicht durch unmittelbare Bestrahlung der kleinen Stämmchen verursacht, sondern hauptsächlich durch Erhitzung der obersten Bodenschicht und Wärmeableitung an die Pflänzchen; dunkler Boden erhöht die Gefahr ganz wesentlich. Der nur an zartrindigen und zartborkigen Stämmen auf-

tretende Rindenbrand ist nicht zu befürchten, wenn eine Freistellung der im Schatten oder Teilschatten erwachsenen Stämme gegen Südsüdost bis Westsüdwest nicht vorgenommen wird. (Notfalls Umfütterung der Stämme durch Unterbau — wenn sich ein Angriff von den genannten Richtungen her nicht umgehen läßt — oder der einzelnen Überhältern.)

Dagegen führt die Erhitzung des Bodens und der Pflanzenteile bei Feuchtigkeitsmangel zu Austrocknungsschäden, die durch die starke Verdunstung bewirkt werden. Die besonders gefährdeten Lagen und die Mittel, die zur Verringerung dieser Gefahren angewandt werden können, wurden unter dem Abschnitt „Temperaturverteilung" behandelt. Die dort besprochenen, je nach Hangneigung und -richtung verschiedenen Temperaturverhältnisse sind ausschließlich eine Folge der (ungehinderten) Sonneneinstrahlung; bei bedecktem Himmel verschwinden sie. Die Sonnenstrahlung als Wärmequelle führt auf den unmittelbar beschienenen Flächen in Bodennähe zu einer Verteilung der Strahlungstemperaturen nach Hanglage und Hangrichtung und in den Beständen mit verschiedenem Aufbau, die dem Gang — jedoch nicht der Größe nach — dem Bilde der schon besprochenen Lufttemperaturen entspricht.

Sonnenscheinverhältnisse am Bestandsrand

R. Geiger[32]) hat in einer Abhandlung die Dauer der Besonnung des an einem Bestandsrand angrenzenden Freilandes für waagerechtes Gelände und die Breite des Schattens (in Abhängigkeit von der Bestandshöhe), den ein Bestand auf den Nachbargrund wirft, für alle möglichen Bestandsrandlagen erörtert. Für den höchsten und tiefsten Sonnenstand und für die Zeit der Tagundnachtgleiche wurden die Verhältnisse von ihm in Abbildungen dargestellt; von einer Wiedergabe dieser Abbildungen wird aus Ersparnisgründen abgesehen.

Hier soll nur auf die Dauer der Besonnung des an einem Bestandsrand angrenzenden Freilandes näher eingegangen werden. Die Beschattung bewirkt am Nordrand nur Lichtminderung, aber keinen Lichtmangel, obwohl dort nur zwischen 21. März und 23. September in den ersten Morgen- und letzten Abendstunden Besonnung stattfindet. Nicht die Lichtverhältnisse sind in unserem Falle von Bedeutung für den Forstmann, sondern die durch die Sonneneinstrahlung bedingten Temperaturverhältnisse in der Wachstumszeit. Je länger und stärker die Sonneneinstrahlung, desto größer die Temperaturerhöhung des Bodens und der Luft in Bodennähe und damit auch die Verdunstung.

Die Stärke der Sonneneinstrahlung in der Zeiteinheit wächst mit der Höhe des Sonnenstandes (bei waagerechtem Boden), sie ist am Mittag immer am größten. Ost-, Süd- und Westränder weisen während des ganzen Jahres um 12 Uhr wahre Ortszeit keinen Schatten auf; sie sind zur Zeit der stärksten Einstrahlung frei der Sonne ausgesetzt. Während aber die Westränder vor und die Ostränder nach 12 Uhr Schatten genießen, ist der Südrand zwischen ½8 und ½15 Uhr (zur Zeit der Sommersonnenwende) ohne Schatten[33]). Die Bestrahlungsdauer ändert sich mit der Jahreszeit; be-

---

[32]) R. Geiger, Die Beschattung am Bestandsrand. Forstwiss. Centralbl., 1935, S. 789.

[33]) Die Sonne steht um 6 Uhr morgens bzw. abends nur am 21. März und 23. September genau im Osten bzw. Westen.

schränken wir uns auf die Zeit zwischen 21. März und 23. September, so finden wir für die Breite von München folgende Bestrahlungszeiten (abgerundet auf halbe Stunden):

Sonnenscheindauer in Stunden

Bestandsrandlage	21. März	22. Juni	23. September
Nord	0	3½	0
Nordost	3½	6½	3½
Ost	6	8	6
Südost	8½	9½	8½
Süd	12	9	12
Südwest	8½	9½	8½
West	6	8	6
Nordwest	3½	6½	3½

Zur Zeit des Sonnenhöchststandes (Ende Juni) weisen demnach nicht der Südrand, sondern die etwas nach Osten und Westen gedrehten Bestandsränder die längste Sonnenscheindauer auf (die stärkste Lichteinstrahlung je Zeiteinheit bei waagerechtem Boden genießt allerdings der Südrand). Um die Sommersonnenwende empfangen der West- und Ostrand noch je 8 und sogar der Nordwest- und Nordostrand noch 6½ Stunden Sonne. Bei schon vorhandenem Feuchtigkeitsmangel kann sich die Besonnung sehr ungünstig auf den Wasserhaushalt auswirken; nur Nordnordwest-, Nord- und Nordnordostränder weisen so kurze Sonnenscheindauer auf, daß die durch Bestrahlung veranlaßte Verdunstung gering ist, zumal die Sonnenstrahlen das an diese Bestandsränder angrenzende Freiland nur unter einem sehr spitzen Winkel treffen und deshalb dort keine starke Temperaturerhöhung des Bodens bewirken können.

Unnötiger Wasserverlust — im vorliegenden Falle Verdunstung durch Sonnenbestrahlung des Bodens — wird vermieden, wenn die Öffnung eines Bestandes zur Einleitung und Durchführung der Verjüngung nur von Nordnordwest, Nord oder Nordnordost her erfolgt. Insbesondere bei Freilegung des Bodens ist der durch Einstrahlung bewirkte Wasserverlust auf Nordwest-, Nordost- und Osträndern schon sehr beachtlich, auf West-, Südwest-, Süd- und Südosträndern stark. Je geringer die zur Verfügung stehende Wassermenge ist — während der ganzen Wachstumszeit bzw. während kürzerer oder längerer Trockenzeitabschnitte —, desto bedeutungsvoller ist die Beachtung der verschiedenen Bestandsrandlagen bei waldbaulichen Maßnahmen vom Standpunkt des Wasserhaushaltes aus. Die bevorzugte Stellung der Nordnordwest-, Nord- und Nordnordostrandlagen in bezug auf den Wasserhaushalt verdient bei wirtschaftlichen Maßnahmen nur dann Beachtung, wenn der Standort zu trocken ist. Herrscht kein Feuchtigkeitsmangel, so sind bei Angriffen von den genannten Richtungen her die günstigeren Temperaturverhältnisse aller anderen Bestandsrandlagen zu beachten; natürlich muß auch in Betracht gezogen werden die örtlich verschiedene Sturmgefährdung, die Bringungsrichtung und unter Umständen die Gefahr zu dichter Ansamung (Fichte).

IV. Niederschlag

Wasserhaushalt im Walde

Da das Wasser ein Standortsfaktor erster Ordnung ist — in vielen Fällen ist es fast allein ausschlaggebend für das langsamere oder raschere Gedeihen des Waldes — werden alle Einzelkräfte, die zu seiner Vermehrung bzw. Verminderung beitragen, besprochen.

Vom meteorologischen Standpunkt aus umfaßt die

Einnahmeseite (a):

1. den Niederschlag, der sehr starken Schwankungen (täglich, monatlich, jährlich) unterworfen sein kann;
2. den Grundwasserzustrom, der unter Umständen (genügend hohes Anstehen, Ergiebigkeit und Beständigkeit) wesentlich zum günstigen Wasserhaushalt einzelner Geländeteile beitragen kann;
3. den oberirdischen Zufluß (Bäche, Flüsse), der den benachbarten Grund mit Wasser reichlich versehen kann;
4. die innere und äußere Taubildung (Wasserdampfkondensation im Boden und an oberirdischen Pflanzenteilen), die besonders in Dürrezeiten von großer Bedeutung ist;
5. das von den Zweigen, Nadeln und Blättern aus der Luft ausgekämmte Wasser, das dort in gasförmiger, flüssiger oder fester Form vorhanden ist (Duftbildung, Nebelniederschlag im Walde, Rauheis- und Rauhfrostanhang);
6. das durch Zerfall von organischen Stoffen freiwerdende Wasser.

Ausgabeseite (b):

1. den oberirdischen Abfluß, der stark von der Art der Bodenoberfläche, der Neigung des Geländes, der Wasserdurchlässigkeit des Bodens, der Niederschlagsmenge in der Zeiteinheit (Intensität) und der Niederschlagsform (Regen, Schnee usw.) abhängig ist;
2. das Sickerwasser, das in größere Tiefen absinkt;
3. den Grundwasserabfluß;
4. die Verdunstung des oberirdisch vorhandenen Wassers (Regenwasser, Tau, Schnee und Eis am Boden oder an oberirdischen Pflanzenteilen);
5. die Verdunstung aus dem Boden (Wasserentzug durch die Pflanzen im nächsten Abschnitt).

Betrachten wir den Wasserhaushalt vom waldbaulichen Standpunkt aus, so kommen auf der Einnahmeseite noch der kapillare Aufstieg, der besonders in humus- und feinerdereichen Böden von Bedeutung ist, und das Wasserhaushaltungsvermögen der obersten Bodenschichten und auf der Ausgabeseite der Wasserverbrauch der im Walde

stockenden, forstlich nicht nutzbaren bzw. wertlosen Unkräuter hinzu. Der verbleibende Rest steht den Waldbäumen und den forstlichen Hilfspflanzen zur Verfügung.

Eine Vermehrung der Niederschlagsmenge in nennbarem Ausmaß kann durch waldbauliche Maßnahmen nicht erreicht werden. Nur die Menge des Taus und des durch Zweige, Nadeln und Blätter aus Nebel ausgekämmten Wassers kann durch Vergrößerung der Auffangfläche (Unter- und Zwischenstand, unruhiges Kronendach — plenterwaldartige Bestände) vermehrt werden. Dabei stammt nach Ansicht des Verfassers ein Großteil des Taus aus dem von den lebenden Pflanzen ausgeatmeten und ausgepreßten (Guttation) Wasser, denn es ist durchweg an lebenden Pflanzen mehr Tau zu finden als an gleichgearteten toten.

Künstliche Bewässerung und Hebung des Grundwasserspiegels zur Verbesserung des Wasserhaushaltes können zwar örtlich und gebietsweise von größter Bedeutung sein — ebenso wie Entwässerung bei einem Zuviel an Wasser —, allgemein anwendbar ist jedoch Bewässerung bei dem heutigen Stand der Waldwirtschaft für große Gebiete in Deutschland nicht. In Württemberg (Sulmtal bei Heilbronn) soll in den nächsten Jahren unter Leitung von Herrn Oberbaurat Dr. Seyfried, Heilbronn (Neckar), künstliche Bewässerung von Wald im großen durchgeführt werden. Die Vergrößerung der Wuchsleistung der bewässerten Bestände steht bei den gegebenen Verhältnissen außer Frage; die Wirtschaftlichkeit wird sich erst erweisen müssen. Die Kosten für die Bewässerungsanlage und ihre Erhaltung gehen zu Lasten der zu bewässernden hochwertigen Kulturböden (Weinberge und Obstanlagen); die Bewässerung des angrenzenden Waldes wird durch die genannten Ausgaben nicht belastet (auch nicht anteilmäßig). Bei der Waldbewässerung fallen nur die reinen Pumpkosten an, die je m^3 zwei bis drei Reichspfennige betragen.

Sehr wesentlich läßt sich dagegen der Wasserhaushalt verbessern. Durch waldbauliche Maßnahmen kann die Wassermenge beträchtlich verringert werden, die verlorengeht, ohne von den Waldbäumen genutzt zu werden.

Zu b), 1 und 2: Der oberirdische Abfluß und das rasche Versickern in größere Tiefe lassen sich herabsetzen durch Schaffung humus- und feinerdereicher oberster Bodenschichten und Vermeidung jeder Freilegung des Bodens. Insbesondere ist dies wichtig bei Starkregen und Schneefall, denn durch diese beiden Niederschlagsarten kann eine Anreicherung des Bodens mit Wasser — ein Feuchtigkeitsrückhalt für Trockenzeiten — erfolgen, wenn der oberflächliche Abfluß und das rasche Versickern in größere Tiefen verhindert wird.

Zu b), 4: Die Verdunstung des Niederschlagwassers steigt unter sonst gleichen Bedingungen mit der Größe der Oberfläche, an der es haftet. In einem Bestand mit viel Unter- und Zwischenstand oder einem Plenterbestand ist sie demnach größer als in einem einstufigen Hochwald. Trotzdem ist diese Art von Beständen wasserwirtschaftlich günstiger (Näheres siehe Abschnitt VII, Verdunstung). Übermäßig dichte Naturverjüngung und besonders ein dichter Überzug von forstlichen Unkräutern sind aus zwei Gründen ungünstig:

1. sie verhindern das Eindringen des Regens (besonders des Schwachregens) in den Boden und
2. entnehmen den obersten Bodenschichten eine große Menge Wasser zu ihrem Wachstum; das von den Unkräutern verbrauchte Wasser wäre vom forstlichen

Standpunkt aus für die wertvollen Bestandsteile erwünscht. Ein dichter lebender Bodenüberzug muß aus wasserwirtschaftlichen Gründen möglichst vermieden werden.

Zu (b), 5: Die Verdunstung aus dem Boden kann weitgehend durch die Abhaltung des Windes und der unmittelbaren Sonneneinstrahlung verhindert werden. Es gehört zu den wichtigsten Aufgaben des Forstmannes, dafür Sorge zu tragen, daß das in den Boden gelangte Wasser zur Verfügung des Waldes steht und nicht zwecklos von forstlichen Unkräutern verbraucht oder durch Verdunstung an die Luft unmittelbar abgegeben wird.

Die Einnahme- und Ausgabeposten der Wasserwirtschaft im Walde wurden so eingehend besprochen, weil ihre planvolle Führung von außerordentlicher Bedeutung für eine ertragreiche Forstwirtschaft ist und weil die Grundlagen, nach denen sie bisher beurteilt wurden, vielfach ungenügend sind: Die Niederschlagsmenge, die in ihrer Verteilung, ihrer großen monatlichen und jährlichen Schwankung und ihrer Form (Regen bzw. Schnee) für alle Gebiete Deutschlands genauestens bekannt ist, genügt keineswegs, um den Wasserhaushalt im Walde an einem bestimmten Ort erfassen zu können. Durch waldbauliche Maßnahmen läßt sich unter Umständen erreichen, daß in einem Gebiet mit 500 bis 600 mm jährlichem Niederschlag den Waldbäumen in der Wachstumszeit mehr Wasser zur Verfügung steht als in einem anderen mit 700 bis 800 mm. Nicht der Niederschlag als solcher läßt sich von Menschenhand wesentlich erhöhen, sehr wohl aber die den Bäumen zur Verfügung stehende Wassermenge: sie läßt sich in einem Ausmaß abwandeln, wie es auf Großflächen sonst nur bei Wind und Einstrahlung, nicht dagegen bei Temperatur und Luftfeuchtigkeit möglich ist oder werden wird.

Bedeutung der Hangrichtung und -neigung

R. Geiger [siehe [23]] hat am Hohen Karpfen die Niederschlagsmengen im Laufe eines Sommers gemessen und in ihrer Abhängigkeit von der Hangrichtung — in bezug auf die Windrichtung zur Zeit des Niederschlages — dargestellt. Dabei hat sich für das untersuchte Gelände (kegelförmiger Berg von geringer Höhe) gezeigt, daß die Niederschlagsmenge, welche auf die Flächeneinheit des geneigten Hanges fällt, nur in sehr geringem Maße von der Hangrichtung (Luv, Flanken, Lee) abhängig ist. Die Abweichungen sind so gering, daß sie am Hohen Karpfen praktisch ohne Bedeutung sind. Die Unterschiede nehmen mit zunehmender Regenstärke (Regenmenge in der Zeiteinheit) ab; sie sind am größten bei Schwachregen. Da aber Schwachregen für die Wasserversorgung des Waldes vom Boden her keine nennenswerte Rolle spielen — sie können nur bei herrschender Dürre Vertrocknungsschäden an den oberirdischen Pflanzenteilen dadurch verhindern, daß von den Blättern das daran haftende Wasser unmittelbar aufgenommen und weitere Verdunstung aus den Blättern verhindert wird —, sind die dabei auftretenden Unterschiede für die Forstwirtschaft nur von untergeordneter Bedeutung.

Bei Beurteilung der Niederschlagsverhältnisse im Luv und Lee von Bodenerhebungen muß eine scharfe Trennung zwischen Gebirgen und hohen Bergen einer-

seits und Hügeln und niedrigen Hindernissen andererseits gemacht werden. Im ersteren Falle tritt durch die beträchtliche Hebung des zum Aufsteigen gezwungenen Luftstroms eine beachtliche Temperaturerniedrigung der aufsteigenden Luftmasse ein (für je 100 m Hebung 0,5 bis 1,0° C), die zur Kondensation und damit zur Niederschlagsbildung führen kann. Im zweiten Fall führt das geringe Ansteigen der Luft zu keiner nennbaren Temperaturerniedrigung und damit auch zu keinem beachtlichen zusätzlichen Ausscheiden von Wasser auf der Luvseite des Hindernisses. Am Hohen Karpfen hat sich ergeben, daß Erhebungen von etwa 100 m über das umgebende Gelände — namentlich wenn sie nicht nur über-, sondern auch umströmt werden — keine durch vermehrten Niederschlag begünstigte Luvseite haben.

Senkrecht zur herrschenden Windrichtung verlaufende Gebirge (z. B. Schwarzwald, Bayerischer Wald) haben dagegen eine ausgesprochene feuchte Luv- und trockene Leeseite. Auf den oberen Teilen der leeseitigen Hänge können unter bestimmten Voraussetzungen (Luftruhe) große Schneemengen abgelagert werden; für die Feuchtigkeitsverhältnisse auf diesen Hangteilen kann das von wesentlicher Bedeutung sein. Für die Niederschlagsverhältnisse auf diesen großräumigen Flächen geben die vorhandenen Niederschlagswerke — für Süddeutschland von J. Haeuser[34]) — dem Forstmann ausgezeichnete Grundlagen. — Bei niedrigen Erhebungen finden wir dagegen eine trockene Luv- und eine feuchte Leeseite (siehe Abschnitt VII, Verdunstung).

Die vielfach vertretene Ansicht, daß ein zur Richtung des regenbringenden Windes senkrecht stehender Bestandsrand deshalb mehr Niederschlag erhält, weil die Luft an seiner Luvseite zum Aufsteigen gezwungen ist und dadurch Wasser ausgeschieden wird, ist nicht richtig. Auch ein 30 m hoher Bestand bewirkt bei der Überströmung nur eine so geringe Temperaturerniedrigung der zum Aufsteigen gezwungenen Luft, daß eine nennenswerte Wasserdampfkondensation nicht eintritt. Erfolgt Niederschlag bei Wind, so fallen die Regentropfen nicht senkrecht, sondern schräg in Windrichtung und zwar um so schräger je größer die Windgeschwindigkeit ist. Ein Bestandsrand, der senkrecht oder schief zu schrägfallendem Regen verläuft, erhält auf Kosten des dahinterliegenden Bestandes auf der Luvseite mehr Niederschlag, weil er je Flächeneinheit des Bodens eine größere Auffangfläche aufweist als gleichgroße dahinterliegende Bestandsteile. Der Bestandsrand „kämmt" in diesem Falle Regen aus, und zwar um so mehr, je höher und dichter bemantelt er ist und je schräger die Regentropfen fallen. Auf der Leeseite des Bestandes, im Windschatten, fällt eine geringere Regenmenge (vgl. Chr. Wagners „Räuml. Ordnung").

Wesentlich anders als bei Regenniederschlag liegen die Verhältnisse bei Schneefall: örtlich und kleinörtlich ist die gefallene Schneemenge weitgehend von der Windgeschwindigkeit während des Schneefalls — bei pulveriger Beschaffenheit des Schnees auch von der Luftbewegung nach dem Fall — und von der Rauhigkeit der Bodenoberfläche abhängig. Da die Schneeflocken, wenn sie nicht naß und schwer sind, annähernd die Geschwindigkeit des beim Fall herrschenden Windes annehmen und außerdem an glatten Stellen des Bodens wieder weggefegt werden können, finden wir kleinörtlich im Walde sehr verschiedene Schneehöhen: an allen Stellen,

---

[34]) J. Haeuser, Die Niederschlagsverhältnisse in Bayern und in den angrenzenden Staaten. München, 1930, Verlag Riedel.

über welchen die Windgeschwindigkeit herabgesetzt ist, oder wo in Bodennähe dichter lebender oder toter Pflanzenüberzug ein Wegfegen des Schnees verhindert, finden wir Schneeanhäufungen auf Kosten der dem Winde frei ausgesetzten, nackten Bodenstellen. Für die Anreicherung des Bodens mit Winterfeuchtigkeit ist die örtlich und kleinörtlich sehr verschieden hohe Schneeablagerung von größter Bedeutung.

Schneeverhältnisse am Bestandsrand

Vom Verfasser wurden anläßlich der Untersuchung des Windschutzes des Waldes Schneehöhenmessungen an dem Ostrand eines etwa 12 m hohen Fichtenbestandes bei Unterhaching vor München ausgeführt[35]). Obwohl es sich dabei nur um eine, allerdings sehr ausführliche Messung handelt, so können daraus doch einwandfreie Schlüsse auf die Gesetzmäßigkeiten der Schneeverteilung am Bestandsrand gezogen werden. In Abb. 8 sind die seinerzeit gewonnenen Untersuchungsergebnisse dargestellt. Auf einer verharschten und verfirnten Altschneedecke, deren Entstehung und Geschichte im ein-

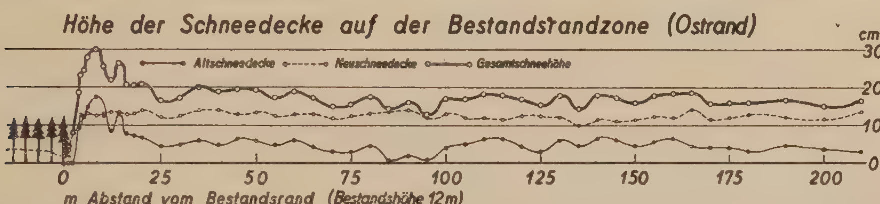


Abb. 8. Schneehöhen in Bestandsrandnähe. (Anm.: Aus: M. Woelfle, Wald- und Windschutz. Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1936, Seite 444, Ab. 6)

zelnen nicht bekannt ist, wurde in den letzten Tagen vor der Messung eine Neuschneedecke von pulveriger Beschaffenheit abgelagert. Betrachten wir die Gesamtschneelage, so finden wir bis zum Abstand von etwa doppelter Bestandshöhe eine wesentlich größere Schneemenge als auf dem weiter entfernten Freiland.

Im allgemeinen erhält Freiland, das an einen Bestand angrenzt, auf einem Streifen längs des Bestandsrandes eine größere Schneemenge, weil durch die Windabbremsung in Bestandsnähe die Schneeflocken in größerer Zahl ausfallen (besonders auf der Leeseite des Bestandes).

Aber nicht nur die erhöhte Schneeablagerung in Bestandsrandnähe verursacht den günstigeren Wasserhaushalt auf diesen Flächen, sondern auch die dort — gegenüber Freiland — herabgesetzte Verdunstung (bessere Erhaltung des Niederschlages). Mit Ausnahme des Südrandes genießen alle Bestandsrandlagen bei der im Winter tiefstehenden Sonne auf einem ziemlich breiten Streifen Schatten; am meisten der Nordrand, der im Winterhalbjahr nie besonnt wird. Die durch Sonneneinstrahlung bewirkte Schneeverdunstung ist auf zeitweise beschatteten Flächen gegenüber dem der Sonne voll ausgesetzten Freiland wesentlich herabgesetzt. Dabei ist hervorzuheben, daß Schneeverdunstung auch bei Temperaturen unter Null Grad stattfindet. Eine ähnliche Be-

---

[35]) M. Woelfle, Schneehöhenmessung auf Versuchsfeld Unterhaching in „Wald und Windschutz“. Forstwiss. Centralbl., 1936, S. 444.

günstigung der Bestandsrandzonen vom wasserwirtschaftlichen Standpunkt aus bewirkt die Windabbremsung in Bestandsnähe. Je größer die Windgeschwindigkeit, desto größer die Verdunstung (in die Verdunstungsgröße geht die Wurzel aus der Windgeschwindigkeit ein; siehe Abschnitt VII, Verdunstung).

Die in Bestandsrandnähe abgelagerten größeren Schneemengen kommen nicht bei allen Bestandsrandlagen dem darunterliegenden Boden in gleichem Ausmaß zugute. Durch Sonneneinstrahlung geht auf dem Wege der Verdunstung ein Teil für den Boden verloren; am größten ist die Verdunstung durch Sonneneinstrahlung am Südrand, am kleinsten am Nordrand; Ost- und Westrand nehmen eine Mittelstellung ein, wobei der Ostrand etwas weniger verliert. Auch die durch Wind verursachte Verdunstung ist an einzelnen Bestandsrändern verschieden groß: im Lee des Bestandes ist sie geringer als im Luv und an den Flanken. In Deutschland ist demnach auf östlichen Randlagen, auf denen häufig auch die größte Schneemenge abgelagert wird (Leeseite der meist aus Westen kommenden, schneebringenden Winde), die Verdunstung durch Windwirkung am geringsten.

Ordnen wir die Bestandsrandlagen nach der Größe der dem Boden zukommenden Feuchtigkeit aus Schneeablagerungen, so ergeben sich für waagerechtes Gelände: Nord-, Ost-, West- und Südrand. Auch in diesem Falle weist der Nordrand die wasserwirtschaftlich günstigsten, der Südrand die ungünstigsten Verhältnisse auf (Hochlagen scheiden für diese Betrachtungen aus.) — Erfolgt Schneefall bei völliger oder nahezu völliger Luftruhe, so üben Bestandsränder keinen Einfluß auf die örtliche Verteilung aus: die Schneedecke weist überall die gleiche Höhe auf.

Wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund des Wasserhaushaltes im Walde, der Niederschlagsverhältnisse am Hang und der Schneeverhältnisse am Bestandsrand

Auf dem weitaus größten Teil des deutschen Waldbodens läßt sich durch Feuchtigkeitserhöhung auch Wuchssteigerung erzielen: der Wald leidet jährlich zu bestimmten Zeiten oder wenigstens in Trockenjahren unter Wassermangel. Die Waldfläche, die immer oder meistens ein Zuviel an Wasser aufweist, ist der Fläche nach ganz bedeutend geringer; für die nachfolgend vorgeschlagenen Maßnahmen kommt sie nicht in Betracht.

Bei allen Verjüngungsverfahren kann auf den Wasserhaushalt Rücksicht genommen werden; je nährstoffärmer, flachgründiger und geneigter ein Boden ist, desto dringlicher ist diese Rücksichtnahme. Im einzelnen handelt es sich um:

1. Vermeidung von Bodenfreilegung, oder sofern sie durch Naturereignisse geschaffen wurde, möglichst rasche Bedeckung mit forstlichen Hilfspflanzen oder mulchieren. (Wind und Sonneneinstrahlung können dann nicht zu starker Verdunstung führen.)
2. Schaffung und Erhaltung einer wasserhaltenden obersten Bodenschicht, besonders durch Humusanreicherung. (Keine Streuabgabe, sofern nicht Rohhumusschichten vorhanden sind.)

3. Möglichste Verringerung der wasserverbrauchenden Unkräuter durch Erhaltung und Schaffung von allseits geschlossenen ein- oder mehrschichtigen Beständen oder bei schon eingetretener starker Verunkrautung mulchieren.

Die Versuche der Bodendeckung geringwertiger Kiefernböden mit Pflanzenstoffen, die L. Fabricius [siehe [27])] durchgeführt hat, vereinen die oben vorgeschlagenen Maßnahmen, und ihre Anwendung im Forstbetrieb dürfte in vielen Fällen — namentlich auch auf trockenen oder verhagerten Böden — zu beträchtlichen Wuchssteigerungen führen. Auf vernäßten oder rohhumusreichen Standorten ist künstliche Bodendeckung selbstverständlich nicht am Platze, dort muß im Gegenteil für Wind und Sonne Zugang geschaffen werden.

V. Luftfeuchtigkeit

Luftfeuchtigkeitsbestimmungen im Walde

Fast durchwegs wird im forstlichen Schrifttum bei Luftfeuchtigkeitsbestimmungen die relative Luftfeuchtigkeit angegeben, d. h. das 100fache Verhältnis zwischen dem in der Luft enthaltenen Wasserdampf zu der Menge, bei welcher die Luft mit Wasserdampf gesättigt ist. Diese Angaben lassen sich ohne weiteres an den häufig verwendeten Haarhygrometern oder- hygrographen ablesen. Auch die mit Psychrometern verschiedener Bauart (nach August, Schubert oder Aßmann) gewonnenen Feuchtigkeitsergebnisse werden meist in Form der relativen Luftfeuchtigkeit dargestellt. Ist bei diesen Veröffentlichungen die gleichzeitig herrschende Lufttemperatur angegeben, so läßt sich aus den beiden genannten Größen die absolute Feuchtigkeit berechnen. Man versteht darunter den Dampfdruck in Millimeter, den der in der Luft enthaltene Wasserdampf ausübt. Innerhalb des für den Forstmann wichtigen Temperaturbereiches ist der Dampfdruck in Millimeter mit hinreichender Genauigkeit gleich dem Gewicht des Wassers in Gramm, das in einem m^3 Luft enthalten ist.

Die absolute Feuchtigkeit (zusammen mit der Temperatur) gibt dem Fachmann ein viel besseres Bild der Feuchtigkeitsverhältnisse als die relative Feuchtigkeit; letztere liefert nur einen rohen Überblick und bietet ohne Temperaturangabe keine Vergleichsmöglichkeit. Aus Temperatur und absoluter Feuchtigkeit läßt sich sehr einfach der Taupunkt (d. h. die Temperatur, bei der durch die Abkühlung der Luft die Ausscheidung von flüssigem Wasser beginnt) und der Dampfhunger (Sättigungsdefizit; Unterschied zwischen der in der Luft von gegebener Temperatur bei Sättigung enthaltenen Wassermenge und der tatsächlich vorgefundenen Menge, ausgedrückt in Millimeter Dampfdruck oder in Gramm Wasser je m^3 Luft) bestimmen.

Der Taupunkt hat für die Forstwirtschaft insofern Bedeutung, als die ausgeschiedene Wassermenge (innerer und äußerer Tau) bestimmt werden kann, wenn der Betrag der Unterschreitung des Taupunktes und die Menge der abgekühlten Luft bekannt ist. Zu dieser so bestimmten Taumenge kommt noch zusätzlich ein Teil des von den Pflanzen ausgeatmeten und ausgepreßten Wassers; diese Menge kann nach Ansicht des Verfassers an oberirdischen, lebenden Pflanzenteilen sehr beträchtlich sein.

Der Dampfhunger ist eine für die Verdunstung (siehe Abschnitt VII) äußerst wichtige Größe; er ist zusammen mit Windgeschwindigkeit, Temperatur der verdunstenden Fläche (bzw. des Wassers) und der Luft und dem Luftdruck bestimmend für den in Dampfform übergehenden Teil des Wassers. (Die nach Holzart stark verschiedene Menge des durch die Bäume ausgeatmeten Wassers hängt ebenfalls von den genannten Größen weitgehend ab).

Es wäre wünschenswert, wenn bei zukünftigen Feuchtigkeitsuntersuchungen im Walde nicht die relative Luftfeuchtigkeit in den Vordergrund gestellt würde, sondern der Dampfhunger und die Temperatur. Im nachfolgenden werden auch nur diese beiden Größen behandelt.

Bedeutung des Bestandsaufbaues

R. Geiger [siehe [25])] hat mehrere Monate lang die relative Feuchtigkeit in zwei 15 m hohen Kiefernbeständen bei Wondreb (Bestand I ohne, Bestand II mit Fichten- zwischen- und -unterstand) in den Höhen 2,4; 12,6 und 16 m über Boden untersucht. Aus dem von ihm für die Monate Mai, August und Oktober gemessenen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverhältnissen (relative Feuchtigkeit) wurde die absolute Feuchtigkeit und der Dampfhungerhöchstwert (monatliche Mittel) berechnet und für unsere Betrachtungen zugrunde gelegt.

An die Zahlenwerte dürfen keine zu großen Genauigkeitsanforderungen gestellt werden: das Wesentliche bringen sie zum Ausdruck, die physikalisch-mathematische Genauigkeit war nicht zu erreichen und für den vorliegenden Fall ist sie auch nicht erforderlich. Die möglichen kleinen Abweichungen in Abb. 9 gegenüber den wirklichen Verhältnissen sind bedingt durch:

1. Die zur Berechnung der absoluten Feuchtigkeit verwendeten Temperaturen, die seinerzeit mit Thermographen gewonnen wurden, sind im Mittel etwas zu hoch, weil für heitere Tage eine durch Strahlung etwas nach oben gefälschte Lufttemperatur gemessen wurde.

2. Es mußte vorausgesetzt werden, daß der Tiefstwert der relativen Feuchtigkeit mit dem Höchstwert der Temperatur zeitlich zusammenfällt. In der Regel dürften diese Voraussetzungen zutreffen. Abweichungen davon werden durch die monatliche Mittelbildung ganz oder fast ganz ausgemerzt.

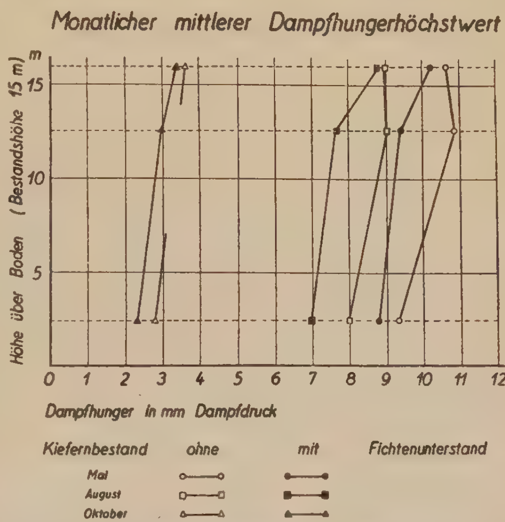


Abb. 9. Mittlere monatliche Dampfhungerhöchstwerte in einem Kiefernbestand mit bzw. ohne Fichtenunter- und -zwischenstand berechnet aus den mittleren monatlichen Temperaturhöchstwerten und Feuchtigkeitstiefstwerten

3. Die Berechnung des mittleren monatlichen Dampfhungerhöchstwertes aus dem mittleren monatlichen Temperaturhöchstwert und dem mittleren monatlichen Tiefstwert der relativen Luftfeuchtigkeit kann etwas abweichende Ergebnisse liefern von der mathematisch einwandfreien Berechnung des täglichen Dampfhungerhöchstwertes (aus dem täglichen Höchstwert der Temperatur und dem Tiefstwert der relativen Luftfeuchtigkeit) und der Mittelbildung daraus.

Auf Abbildung 9 sind die monatlichen mittleren Dampfhungerhöchstwerte in drei Meßhöhen dargestellt: 16 m = etwas über den Kronen, 12,6 m = im Kronenraum und 2,4 m = im Stammraum nahe der Bodenoberfläche. In allen berechneten Fällen ist der Dampfhunger in dem reinen Kiefernbestand größer als in dem Kiefernbestand mit Fichtenzwischen- und -unterstand. Der Kiefernreinbestand ist für Sonne und Wind offener, der von den

Pflanzen und vom Boden abgegebene Wasserdampf wird von dem eingreifenden Wind und der durch Sonnenstrahlung verursachten Luftdurchwirbelung (Turbulenz), die sich in dem lichteren Kiefernreinbestand besser entwickeln kann, weggeführt. Die dargelegten mittleren Unterschiede in den beiden Beständen werden nur durch die heiteren und sonnigen Tage hervorgerufen; an bedeckten oder regnerischen Tagen dürften keine oder nur ganz geringe Unterschiede bestehen, während an sonnigen Tagen die Unterschiede wesentlich größer sind als die dargestellten Mittelwerte. Die Witterungsverhältnisse der einzelnen Beobachtungsmonate sind für die gewonnenen Ergebnisse von größter Bedeutung; es ist deshalb nicht zulässig, allgemein gültige Vergleiche der mittleren Dampfhungerhöchstwerte für den mittleren jährlichen Gang aus der Untersuchung abzuleiten. (Mittlere monatliche Temperatur und mittlerer monatlicher Dampfhunger sind keine unmittelbar zusammengehörigen Größen, es kann deshalb auch nicht daraus ein Schluß auf die Verdunstungsgröße gezogen werden).

Der Dampfhungerhöchstwert ist im Mai in beiden Beständen am größten; dies ist eine Folge der um diese Jahreszeit häufig eintretenden Trockenzeitabschnitte. Über den Kronen (in 16 m Höhe) ist der Unterschied zwischen den beiden Beständen am geringsten — in einer bestimmten Höhe, außerhalb des Einflußbereiches des Waldes, ist er gleich null —, steigt im Kronenraum (12,6 m Höhe) auf den hohen Betrag von 1,4 mm Dampfdruck und geht in Bodennähe (in 2,4 m Höhe) wieder zurück (auf 0,5 mm). Der geringe Unterschied in Bodennähe ist vermutlich bedingt durch die im Frühjahr noch hohe Bodenfeuchtigkeit, die von den Winterniederschlägen herrührt.

Im August ist der Verlauf der beiden Schaulinien teilweise ähnlich wie im Mai — Unterschiede über den Kronen sehr gering, im Kronenraum groß —, nur in Bodennähe des reinen Kiefernbestandes ist der Dampfhungerhöchstwert gegenüber den Maiverhältnissen wesentlich größer als in dem mit Fichten unterstellten Bestand. Dies ist die Wirkung der größeren Austrocknung des Bodens in dem reinen Bestand im Laufe des Frühjahrs und Sommers.

Im Oktober sind die Unterschiede sehr gering geworden (der Wert für den reinen Kiefernbestand im Kronenraum kann wegen eingetretener Gerätefehler nicht genau angegeben werden, er wird aber ungefähr durch die Verbindungslinie der auf Abb. 9 eingetragenen Werte für die Höhen 16 und 2,4 m über Boden bestimmt); auch die Dampfhungerhöchstbeträge sind auf ein Drittel bis ein Viertel der Werte im Mai und August zurückgegangen. Die um diese Jahreszeit wesentlich tiefere Mitteltemperatur und die schwächere Sonneneinstrahlung erklären diese Abnahme.

In der Wachstumszeit ist in einem Bestand ohne Unter- und Zwischenstand der mittlere monatliche Dampfhungerhöchstwert besonders im Kronenraum, aber auch in einigen Metern Höhe über Boden, wesentlich größer als in einem vergleichbaren Bestand mit Zwischen- und Unterstand.

Wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund der Feuchtigkeitsmessungen in Beständen mit verschiedenem Aufbau

Die Bedeutung der Verdunstung für den Wasserhaushalt des Waldes wird ausführlich in Abschnitt VII behandelt; Maßnahmen zur Verringerung des für die Verdunstung sehr wichtigen Dampfhungers können in zwei Richtungen getroffen werden:

1. Verhinderung der Wegführung der feuchten Luft im Walde durch Abhaltung des Windes (dichte bis zum Boden reichende Bestandsmäntel, notfalls Strauchwerk längs der Bestandsränder und Verhinderung des Eingreifens des Windes von oben her bis in den Stammraum durch Erhaltung bzw. Schaffung von Unter- und Zwischenstand).

2. Abhaltung der unmittelbaren Sonnenstrahlung vom Stammraum und Boden. Die Einstrahlung erhöht die Temperatur und damit Dampfhunger und Verdunstung, und außerdem vergrößert sie durch Wärmeaustausch die Luftbewegung am Boden und im Stammraum und beschleunigt auf diese Weise das Wegführen der feuchten Luft aus dem Stammraum. In Beständen mit Unter- und Zwischenstand wird Einstrahlung und Luftbewegung herabgesetzt.

R. Geiger[36]) hat in einer Untersuchung die erstaunlich große Feuchtigkeitsunruhe und -schwankung in unmittelbarer Nähe von sonnenbeschienenem Boden festgestellt. Es ist dies ein Zeichen dafür, daß das vom Boden oder den Pflanzen in Dampfform abgegebene Wasser durch Austausch rasch entfernt wird, wenn Sonneneinstrahlung stattfindet.

Die vorgenannten Maßnahmen dürfen sinngemäß nur dann angewendet werden, wenn während der Wachstumszeit häufig oder regelmäßig Feuchtigkeitsmangel herrscht. Bei einem Zuviel an Wasser muß Sonne und Wind Zutritt in den Stammraum und zum Boden erhalten, um den oft wuchshemmenden Wasserüberschuß durch Verdunstung zu vermindern oder ganz zu beseitigen.

---

[36]) R. Geiger, Über die Luftfeuchtigkeit als Standortsfaktor. Mitt. vom Verein der höheren Forstbeamten Bayerns, 1930, S. 124.

VI. Wind

Die Wirkung des Windes auf den Wald einerseits und der Einfluß des Waldes auf die Windverhältnisse andererseits sind so häufige und eindrucksvolle Erscheinungen, daß sie schon vielfach seit den Anfängen der forstmeteorologischen Forschung bearbeitet wurden. Die günstigen Einwirkungen des Windes auf die Wuchsbedingungen des Waldes (Lufterneuerung im Boden, Bodenlockerung durch Wurzelbewegung, Förderung der Verdunstung der Bäume, Samenverbreitung und Verschlechterung der Lebensbedingungen für schädliche Kerbtiere) werden nachfolgend nicht behandelt, weil sie im Forstmeteorologischen Institut nicht untersucht wurden. Von Einzelfällen abgesehen überwiegen die Nachteile, die eine häufige und stärkere oder starke Luftbewegung für den Wald mit sich bringt, die Vorteile bei weitem. Bei der Wirkung des Windes auf den Wald ist zu unterscheiden zwischen:

1. der von Th. Künkele herausgestellten „Kleinarbeit des Windes"[37]) und
2. den Sturmbeschädigungen (Sturmwurf und -bruch und Wurzelzerreißungen).

Die unter 1. genannten Windwirkungen haben insbesondere Einfluß auf die Verdunstung, die Assimilation, die Verlagerung von leichtbeweglichen Boden- und Streubestandteilen, die Form der Krone und die Stellung und Belaubung der Zweige und Äste. Sie hängen in ihrer Größe ab von der Windgeschwindigkeit, der Wirkungsdauer, der Temperatur und dem Dampfhunger der bewegten Luft, der Geländeausformung, der Rauhigkeit der Bodenoberfläche und der Widerstandskraft der einzelnen Holzarten gegen übermäßige Verdunstung.

Die unter 2. genannten Beschädigungen sind neben der Sturmfestigkeit der Holzart namentlich von der Windgeschwindigkeit, der Richtungs- und Geschwindigkeitsböigkeit, dem Rhythmus der Sturmstöße, der Wirkungsdauer, der Geländeausformung, dem Bodenzustand (trocken, feucht, gefroren), der Bodenzusammensetzung und der Bestandsverfassung abhängig.

Windverhältnisse im Bestand

Wenn es sich nicht um die Gewinnung von Augenblickswerten der Windgeschwindigkeit handelt, sondern um Dauerbeobachtung der mittleren Geschwindigkeit, so werden in der Meteorologie meist Schalenkreuzwindmesser verwendet, die an ein Schreibgerät (Chronograph oder Vielfachschreiber) angeschlossen sind. Für Freilandbeobachtungen zur Gewinnung klimatologischer Unterlagen sind diese Geräte ausgezeichnet geeignet, nicht oder nur beschränkt dagegen zu genauen Windmessungen im Walde, und zwar aus zwei Gründen:

1. können die geringen Windgeschwindigkeiten bis etwa 1 m/sek. nicht damit gemessen werden, weil die Schalenkreuzwindmesser unter (rund) 1,0 m/sek. nicht

---

[37]) Th. Künkele, Die Bodenpflege auf Buntsandstein, insbesondere im Pfälzerwald. Mitteil. des Vereins d. höheren Forstbeamten Bayerns, Januarheft 1923.

anlaufen — gerade die kleinen und kleinsten Windgeschwindigkeiten sind aber im Walde häufig und ihre Erfassung von besonderer Bedeutung;

2. kann mit Schalenkreuzwindmessern nur die Geschwindigkeit der Luftbewegung gemessen werden, die in der Achsenebene der Schalenkreuze verläuft, nicht dagegen die schräg dazu streichende. Senkrecht aufgestellte Schalenkreuzwindmesser — dies ist die übliche Aufstellung — zeigen demnach gerade die im Innern eines Bestandes häufige und wichtige Auf- und Abwärtsbewegung der Luft nicht an. Die Luftaustauschvorgänge in der Senkrechten bleiben bei allen mit Schalenkreuzwindmessern vorgenommenen Messungen unberücksichtigt (bei gewöhnlicher Aufstellung der Windmesser).

Die von R. Geiger und dem Verfasser vorgenommenen Windmessungen wurden mit wenigen Ausnahmen ebenfalls mit Schalenkreuzwindmessern durchgeführt; unter ausdrücklicher Betonung der vorerwähnten Mängel der verwendeten Geräte für Messungen in Beständen werden sie nachstehend dargestellt. — Windmeßgeräte, die eine Daueraufzeichnung der räumlichen Luftbewegung liefern, wurden erst in jüngster Zeit neu geschaffen; eine Verwendung kommt erst nach eingehender Erprobung in Frage.

Bedeutung der Hangrichtung und Hangneigung

R. Geiger hat an dem Bergkegel des Hohen Karpfens während des Sommers die Windgeschwindigkeiten gemessen [siehe [23]]; an dem sehr steilen, regelmäßigen Hügel (30 bis 35 Grad Steigung) wurden durch den vorhandenen, ungleichmäßig vertretenen Pflanzenwuchs die Gesetzmäßigkeiten der Windgeschwindigkeitsverteilung stark gestört; trotzdem lassen sie sich herausarbeiten. Im großen gesehen finden wir auf der Luvseite im Durchschnitt keine größeren Windgeschwindigkeiten als an den beiden umströmten Bergflanken, während die Leeseite ganz bedeutend geringere Geschwindigkeiten aufweist.

Wesentlich andere Verhältnisse wurden vom Verfasser bei einer großen Winduntersuchung auf der Hohen Rhön[38]) festgestellt. Die weiten, flachen, baumlosen Mulden der Bayerischen Hochrhön weisen durchwegs dann die fast gleichen Windgeschwindigkeiten auf wie die Hänge und Höhenrücken, wenn die Geländeneigung nicht mehr als 5 bis 8 Grad beträgt (innerhalb des Untersuchungsbereiches von 1 bis 10 m/sek.). Bei diesen geringen Neigungen schmiegt sich offenbar der Wind ganz der Geländeausformung an: in der Wirkung ist bei diesen Verhältnissen keine Luv- und Leeseite zu erkennen. Bei Geländeneigungen von über 10 Grad bis zu den steilsten untersuchten Hängen von etwa 15 Grad war dagegen ein ausgesprochener Leeschutz bzw. eine erhöhte Geschwindigkeit im Luv festzustellen. Von großer wirtschaftlich-waldbaulicher Bedeutung ist besonders der gefundene Tatbestand, daß bei Umströmung der steileren Hänge (10 bis 15 Grad Neigung), also an den Flanken, höhere Windgeschwindigkeiten aufgetreten sind als auf der Luvseite. Bei dem Umfließen werden die Stromlinien an den Bergflanken zusammengedrängt, und dadurch wird eine Erhöhung der Geschwindigkeit verursacht.

[38]) M. Woelfle, Windschutzanlagen. Forstwiss. Centralbl., 1938, S. 52 und S. 73.

Weder am Hohen Karpfen noch auf der Hohen Rhön konnte Überfallwind festgestellt werden; in beiden Fällen war die Geländeausformung für das Auftreten dieses Windes nicht geeignet: während der kleine, kegelförmige Hohe Karpfen mehr um- als überströmt wird und sich deshalb eine stark absteigende Windströmung nicht ausbildet, schmiegt sich die Luftbewegung dem flachen Gelände auf der Bayerischen Hochrhön fast vollkommen an — das Auftreten von Überfallwind hat als Voraussetzung das Vorhandensein einer Leeschutzzone. Der in der Forstwirtschaft so sehr gefürchtete Überfallwind kann deshalb nur an Hand der von ihm verursachten Sturmschäden (siehe unten) behandelt werden.

In hügeligem oder bergigem Gelände tritt bei ruhigem und sonnigem Wetter infolge der Temperaturunterschiede der Luft über dem Tal und auf den Hängen bzw. Höhenrücken Berg- bzw. Talwind auf. Der tagsüber hangaufwärts streichende Talwind ist über den unteren Teilen der Hänge schwächer und nimmt an Stärke hangaufwärts zu, während der nachts von Berg zu Tal strömende Bergwind auf den oberen Teilen der Hänge schwächer ist und hangwärts an Geschwindigkeit zunimmt. Berg- und Talwind — rein thermische Winde — treten nie in einer Stärke auf, daß Sturmwürfe oder -brüche im Walde durch sie verursacht werden, dagegen können sie durch ihre Häufigkeit und Stetigkeit an besonders ausgesetzten Stellen sehr wohl zu Hemmungen im Wuchs der Waldbäume, Streuverwehungen und Verhagerungen führen.

Bedeutung des Bestandsaufbaues

Die von R. Geiger in Wondreb [siehe [25]] in einem Kiefernbestand mit bzw. ohne Fichtenzwischen- und -unterstand und von Geiger/Amann [siehe [26]] bei Schweinfurt in einem Eichenbestand mit bzw. ohne Buchenunterstand durchgeführten Windmessungen erfaßten die Windgeschwingkeiten von einigen Metern über Boden bis über das Kronendach, also den ganzen Stamm- und Kronenraum. Die Ergebnisse stimmen trotz der Verschiedenheiten der Holzarten (Nadel- bzw. Laubholz) in beiden Fällen sehr gut überein, *sie sind demnach eine Folge des verschiedenen Bestandsaufbaues (ein- bzw. mehrschichtig) und nicht der Holzart.*

Es hat sich gezeigt, daß der Bestand mit Zwischen- und Unterstand immer und in allen Höhen geringere Windgeschwindigkeiten aufweist (um 10 bis 40 %) als der einschichtige Bestand. Nur knapp *über* den Kronen des mehrschichtigen Bestandes ist die Windgeschwindigkeit größer als über dem einschichtigen. Die einen Bestand treffende Luftmenge durchströmt oder überweht ihn; ist er so dicht, daß er nur von einem geringen Teil der Luft durchströmt werden kann, so wird der Großteil der Luft über den Bestand geführt; aus diesem Grunde finden wir knapp über dem mehrschichtigen Bestand größere Windgeschwindigkeiten als über dem einschichtigen.

Ein ähnliches Bild wie die Windgeschwindigkeitsverteilung im Innern der Bestände ergibt auch die Anzahl der windstillen Stunden: in allen Fällen ist sie im mehrschichtigen Bestand größer als im einschichtigen, dies gilt auch für den Eichenbestand vor der Belaubung.

Näher soll auf die Ergebnisse der beiden genannten Untersuchungen nicht eingegangen werden, weil die geringen Windgeschwindigkeiten unter 0,7 bis 1,0 m/sek. mit den Schalenkreuzwindmessern nicht genau gemessen werden konnten und besonders, weil bei allen Messungen eine Berücksichtigung der wichtigen auf- und absteigenden

Strömungen nicht stattfand (dies ist mit Schalenkreuzwindmessern sehr umständlich oder überhaupt nicht möglich). Es wurde nur die Luftversetzung in der Waagerechten bestimmt. Für alle Lebensvorgänge im Bestandsinneren ist aber nicht nur die Luftbewegung in der Waagerechten, sondern die Gesamtbewegung ausschlaggebend.

Eine derart umfassende Untersuchung der Windbewegung im Bestandsinneren liegt bis heute noch nicht vor, ihre Ergebnisse dürften aber in der Richtung liegen, daß der Luftaustausch in einem einschichtigen Bestand gegenüber einem vergleichbaren mehrschichtigen im Verhältnis größer ist, als der Unterschied der in der Waagerechten gemessenen Windgeschwindigkeiten in den beiden Beständen, weil die Sonnenstrahlung in den einschichtigen Bestand mehr eindringen kann als in den mehrschichtigen und dort einen größeren Wärmeaustausch (= aufsteigende und absinkende Luftbewegung) verursacht. Ist die Mächtigkeit der Kronenschicht in einem einschichtigen Bestand gleich der Summe der Schichten in einem mehrschichtigen, so greift zwar der Wind von oben fast in gleichem Ausmaß in beide Bestände ein (der mehrschichtige ist etwas begünstigt, denn mehrere weitmaschige Gitter bremsen den Wind mehr ab als ein engmaschiges); im freien Stammraum des einschichtigen Bestandes kann sich dagegen eine wesentlich stärkere Luftströmung ausbilden als in dem stark durchsetzten des mehrschichtigen. Ein nicht allseits gut geschlossener oder an einzelnen Stellen durchlöcherter einschichtiger Bestand weist immer höhere Windgeschwindigkeiten auf als ein gleichgearteter mehrschichtiger, bei welchem der Ausfall eines Bestandsmantels oder einzelner Stämme dem Wind noch keinen freien Eintritt verschafft.

Windverhältnisse an der Kronenoberfläche

Anläßlich der Giftverstäubung gegen Kieferneule im Jahre 1931 in Mittelfranken hat R. Geiger meteorologische Beobachtungen und besonders Windunteruchungen am Bekämpfungsorte in der Nähe von Feucht vorgenommen und die Ergebnisse veröffentlicht[39]). Bei früheren Giftverstäubungen mit Flugzeug und Motor hatte sich gezeigt, daß der Erfolg dieser Maßnahmen unter anderem weitgehend von der Luftbewegung (Wind und Austausch) in und über dem Kronenraum abhängig ist. Die Luftversetzung in der Waagerechten ist einfach zu messen und zu berücksichtigen; anders verhält es sich mit dem nach allen Richtungen hin erfolgenden Luftaustausch, der hervorgerufen wird durch Temperaturunterschiede der Luft auf kleinstem Raume oder durch feste Körper (z. B. Nadeln, Zweige, Äste, Boden), die wärmer oder kälter als die umgebende Luft sind und zu deren Erwärmung und damit zum Aufsteigen oder deren Abkühlung und damit zum Absinken führen.

Die Untersuchung hat ergeben, daß der in der Waagerechten gemessene Wind von über 1,0 m/sek. über der Kronenoberfläche der Bestände eine erfolgreiche Bestäubung erschwert oder ganz unmöglich macht. Eine Berücksichtigung der Austauschvorgänge bei dieser Festlegung war nicht möglich gewesen, da die Austauschgröße nicht gemessen wurde.

[39]) R. Geiger, Meteorologische Beobachtungen bei der mittelfränkischen Kieferneulenbekämpfung mit Flugzeug und Motor im Frühjahr 1931. Zeitschr. für angewandte Entomologie, 1932, S. 207.

Anders liegen die Verhältnisse bei Anwendung des Motorverstäubers: die Zähigkeit des Luftkörpers im Kronenraum, die bei Flugzeugbestäubung deshalb günstig wirkt, weil der von o b e n zugeführte Giftstaub schon in verteiltem Zustand in den Kronenraum gelangt und dort lange schwebend erhalten wird, erschwert oder verhindert das Einbringen des Giftstaubes mit dem Motorverstäuber von u n t e n: in vielen Fällen verteilt sich die Giftwolke entweder u n t e r dem Kronenraum, oder sie durchstößt ihn und wird dann ü b e r dem Kronenraum vom Winde weggeführt. In beiden Fällen gelangt sie nicht an die gewünschte Stelle im Kronenraum, um sich dort ausbreiten zu können.

Die Giftverstäubung hat in der Zwischenzeit große Fortschritte gemacht; so spielen Feuchtigkeit und Niederschlag bei Anwendung von Berührungsgiften fast keine Rolle mehr. Die Windverhältnisse in der Waagerechten können leicht geklärt werden, mehr oder weniger unbekannt sind nur der Luftaustausch im Kronenraum und knapp darüber und die luftelektrischen Vorgänge bei der Verstäubung.

Die für die Giftverstäubung wichtigen Austauschvorgänge können voraussichtlich nur mit Rauchfäden untersucht werden, nachdem mechanische Windmesser, die die Luftbewegung im Raume — und nicht nur in einer Ebene — messen, noch nicht in solcher Vollkommenheit vorhanden sind, daß laufende, genaue Freilandbeobachtungen damit möglich wären.

Windverhältnisse in der Bestandsmantelzone

Die Durchströmung eines gut bemantelten Bestandsrandes wurde an einem Fichtenbestand (älteres Stangenholz, Mittelhöhe 15 m) im Forstamt Anzing vom Verfasser untersucht[40]). Bei diesen Messungen wurde ein Albrechtscher Hitzdrahtwindmesser verwendet, der Augenblickswerte der Windgeschwindigkeit ergibt und außerdem den Vorteil hat, daß mit ihm die in der Forstmeteorologie wichtigen kleinen und kleinsten Geschwindigkeiten (bis 10 cm je Sekunde) festgestellt werden können. Ein Nachteil dieses Gerätes ist, daß mit ihm — in einfacher Ausführung — nur die Windgeschwindigkeit in einer Richtung gemessen werden kann; bei einer bestimmten Geräteeinstellung wird nur die senkrecht auf die Hitzdrahtebene auftreffende Luft in ihrer Geschwindigkeit richtig gemessen, alle von anderen Richtungen kommenden Luftbewegungen dürften innerhalb des sehr dichten Bestandsmantels wegen der waagerecht verlaufenden Äste nicht vorgekommen sein, dagegen ist eine zeitweise Drehung der Windrichtung der waagerecht verlaufenden Strömung möglich und wahrscheinlich. Da die Hitzdrahtebene während der ganzen Messung senkrecht zum Bestandsrande stand, weil die Luftströmung außerhalb des Bestandes fast stets gleichlaufend mit dem Bestandsrand ist und genau gemessen werden sollte, sind die Werte der Windgeschwindigkeit in der Bestandsmantelzone und im Bestand — dort verläuft der Wind hauptsächlich senkrecht zum Bestandsrand — etwas zu gering (höchstens 15 %).

Abbildung 10 veranschaulicht die gefundenen Ergebnisse. Bei Punkt + 192 cm wurde ein Handwindmesser (Schalenkreuz) während der ganzen Untersuchung eingesetzt; an den anderen Meßpunkten befand sich der Reihe nach der Hitzdrahtwindmesser. Die Schwankungen der jeweils 15 Ablesungen an jedem Punkt (in Abständen von je 5 sek.)

---

[40]) M. W o e l f l e, In „Wald und Windschutz": Windverhältnisse auf der Bestandsmantelzone. Forstwiss. Zentralbl., 1936, S. 437.

wurden als Band auf der Abbildung eingetragen. Die in 52 cm über Boden durchgeführten Messungen ergaben:

1. ein beachtliches Eindringen des Windes durch den sehr dichten Bestandsmantel (mit 20 bis 30 % der Geschwindigkeit des Freilandwindes im Traufabstand von 192 cm);
2. eine wesentliche Abnahme der Geschwindigkeitsschwankungen im Mantel und innerhalb des Bestandes gegenüber dem Freiland;

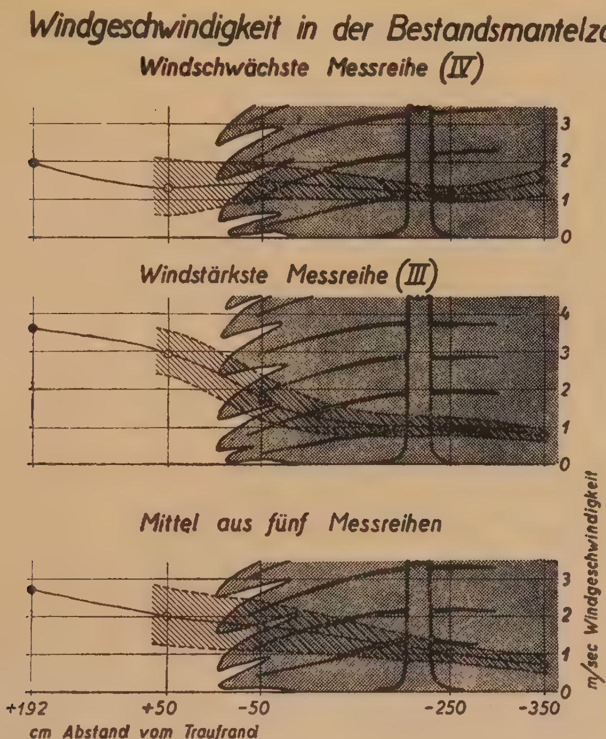


Abb. 10. Windverhältnisse in der Bestandsmantelzone. Ausgefüllte Kreise = Angaben des Schalenkreuzwindmessers; unausgefüllte Kreise = Angaben des Hitzdrahtwindmessers. Schrägschraffiert = mittlere Schwankungen der Windgeschwindigkeit bei den Hitzdrahtmessungen. (Anm.: Aus: M. Woelfle, Wald und Windschutz. Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1936, S. 441, Abb. 4)

3. innerhalb des unter 1. und 2. genannten Rahmens eine Abnahme der Windgeschwindigkeit im Bestandsmantel und innerhalb des Bestandes bei Zunahme der Windgeschwindigkeit von 2,0 auf 3,6 m/sek. über Freiland (bei Punkt + 192 cm) als Folge der Jalousiewirkung der waagerechten Fichtenäste. Schwache Winde können zwischen den einzelnen Ästen durchströmen, stärkere „klappen" die Äste aufeinander und schließen so den Luftzutritt mehr ab.

Ein Vergleich mit den Windverhältnissen in einem offenen Bestandsrand (s. unten) ergibt den außerordentlichen Einfluß eines dichten Bestandsmantels auf die Windver-

hältnisse über der Bestandsmantelzone. Die gefundenen geringen Windgeschwindigkeiten dürften aber trotzdem so groß sein, daß eine Kohlensäuredüngung als wuchssteigernde Maßnahme in einem Bestand nicht in Frage kommt. Der mehrfach im Walde in Bodennähe festgestellte hohe Kohlensäuregehalt der Luft steht nur den Pflanzen von geringer Höhe bei Windstille zur Verfügung; in und über dem Kronenraum herrscht bei Tag durch die Einstrahlung eine so starke Luftdurchwirbelung, daß die vom Boden aufsteigende Kohlensäure rasch in den Oberwind gelangt und weggeführt wird; auch auf freiliegenden Kulturen dürfte das Wegführen der kohlensäurereichen Luft in Bodennähe bei Tag so rasch erfolgen, daß die Kulturpflanzen keinen beachtlichen Nutzen davon haben. Höherer Kohlensäuregehalt der Luft bei Nacht ist für die Assimilation ohne Bedeutung.

Windverhältnisse in der Umgebung von einzelstehenden Bäumen und an offenen Bestandsrändern

Am eindrucksvollsten tritt die schädliche Dauerwirkung des Windes in der Nähe von einzelstehenden Bäumen und an offenen Bestandsrändern dann auf, wenn der Boden nicht gedeckt ist. Die bekannten Verhagerungserscheinungen (s. Abschnitt VII, Verdunstung) sind in der Hauptsache eine Folge der durch Windwirkung erhöhten Verdunstung bzw. Austrocknung.

Th. Künkele[41]) hat den Begriff der Windwirksamkeit (= Windweg) geschaffen, um einen Maßstab für die Gesamteinwirkung des Windes zu haben. Neben dieser großräumigen Windwirksamkeit auf größeren oder kleineren Gebieten — die Berechnung derselben wird an Hand klimatologischer Angaben vorgenommen — gibt es örtlich und kleinörtlich Windwirkungen, die durch Windhindernisse verschiedenster Art bedingt sind (einzelstehende Bäume und Baumgruppen, offene Bestandsränder, größere Steine und Felsen usw.).

Auf der Bayerischen Hochrhön bei Oberelsbach wurden vom Verfasser[42]) die Windverhältnisse in 50 cm Höhe in der näheren Umgebung einer vollständig freistehenden Hutbuche (Höhe 12 m, gut entwickelte, windschiefe Krone) untersucht und mit der Windgeschwindigkeit über unbeeinflußtem Freiland verglichen.

Die Ergebnisse der ausgewerteten Beobachtungen (11 Stunden) sind in Abbildung 11 dargestellt. In Hundertsteln der Geschwindigkeit an dem unbeeinflußten Meßpunkt ausgedrückt finden wir eine Windgeschwindigkeitszunahme bis zu 64 % in 1 m Abstand an den Flanken des umströmten Stammes. In einem Umkreis von rund 5 m ergeben sich auf den Flanken und im Lee noch ganz beträchtliche Geschwindigkeitserhöhungen. Nur eine kleine Fläche im unmittelbaren Leeschutz des Stammes weist eine geringere Windgeschwindigkeit auf als das Freiland. — Stamm und Krone bilden für den Wind ein Hindernis, das umflossen wird; an den Umströmungsseiten treten Geschwindigkeitserhöhungen auf, die bis auf den Boden durchgreifen und zu dem geschilderten Ergebnis führen.

Ähnliche Windgeschwindigkeitserhöhungen treten bei dem Durchströmen von schlecht bemantelten Bestandsrändern auf: der ankommende Wind strömt teilweise über den Bestand, teilweise dringt er — mit erhöhter Geschwindigkeit gegenüber der Geschwindig-

[41]) Waldbauliche Grundsätze und Vorschriften für den Pfälzerwald, bearbeitet von Th. Künkele. Mitteilungen aus der Staatsforstverwaltung Bayerns, 16. Heft, S. 95.

[42]) M. Woelfle, Verhagerungserscheinungen. Forstwiss. Zentralbl., 1937, S. 757.

keit über Freiland — durch den schlecht bemantelten Bestandsrand in den Stammraum ein. Voraussetzung für dieses starke Einströmen in den Stammraum ist, daß dort nicht durch zahlreichen Unterstand oder lebende und tote Äste die Luftbewegung stark gehemmt wird. Vom Verfasser wurde diese Windgeschwindigkeitsverteilung am Rande eines schlecht bemantelten Bestandes anläßlich einer Untersuchung über den Windschutz des Waldes bei Unterhaching festgestellt[43]).

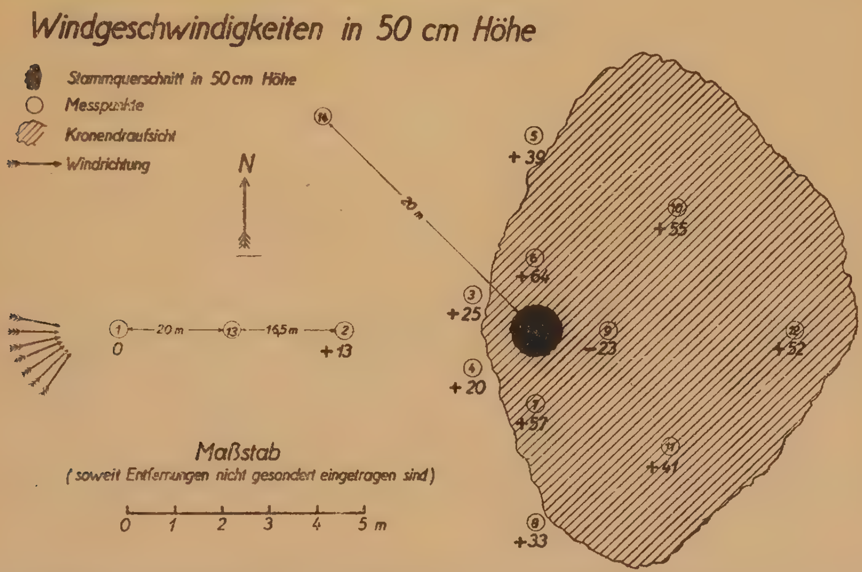


Abb. 11. Windgeschwindigkeiten bei Umströmung eines einzelstehenden Baumes ausgedrückt in Hundertsteln der ungestörten Windgeschwindigkeit bei Meßpunkt 1. + = Zunahme, — = Abnahme gegenüber der Geschwindigkeit bei Meßpunkt 1
(Anm.: Aus: M. Woelfle, Verhagerungserscheinungen. Forstw. Zentralbl. 1937, S. 762, Abb. 4)

Modellversuche, die im Windkanal des Forstmeteorologischen Instituts durchgeführt wurden[44]), haben ebenfalls gezeigt, daß bei Umströmung von Hindernissen besonders dann Geschwindigkeitserhöhungen an der Unterlage auftreten, wenn — bei ungestörtem Winde — eine Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe gegeben ist. Diese Geschwindigkeitszunahme finden wir auch in der Natur in Bodennähe. Eine unmittelbare Übertragung der Ergebnisse der Modellversuche auf die Freilandverhältnisse ist nicht statthaft; sie haben aber immerhin die im Freiland in der Nähe von einzelstehenden Bäumen gefundene Windgeschwindigkeitsverteilung bestätigt.

Windschutz von Wald und Hecken

Die vom Institut ausgeführten Windschutzuntersuchungen wurden am Walde[45]) und an Hecken bzw. künstlichen Hindernissen (Rupfenwänden)[46]) in Höhen von 20 bis

[43]) M. Woelfle, In „Wald und Windschutz". Forstwiss. Zentralbl., 1936, S. 333.
[44]) M. Woelfle, In „Sturmschäden im Walde". Forstwiss. Centralbl., 1937, S. 575.
[45]) M. Woelfle, Wald und Windschutz. Forstw. Centralbl., 1935, S. 351; 1936, S. 235 und S. 429.
[46]) M. Woelfle, Hecken als Windschutzanlagen. Forstw. Centralbl., 1938, S. 15.

etwa 200 cm über Boden vorgenommen; sie hatten den Zweck, die Breite der Schutzzone festzulegen, auf der eine merkliche Geschwindigkeitsminderung eintritt.

Windschutzwirkung des Waldes

Alle Untersuchungen wurden an Nadelholzbeständen (Fichte mit etwas Kiefer und einzeln eingesprengten Laubhölzern) bei Unterhaching vor München und im Anzinger Forst durchgeführt. Eine Berücksichtigung der jahreszeitlichen Änderungen des Wuchszustandes der Nadelholzbestände, der Lufttemperatur und -feuchtigkeit, der Strahlungsverhältnisse und des Bodenzustandes fand nicht statt, weil diese Größen im Vergleich zu der ausschlaggebenden Bedeutung der Windrichtung und -geschwindigkeit nur eine ganz untergeordnete Rolle spielen.

Die Windschutzwirkung ist überraschend wenig vom Winkel, den die Windrichtung mit dem Bestandsrand bildet, abhängig: während die Breite der Schutzzone im Lee eines Bestandes rund der 10fachen Bestandshöhe gleichkommt, finden wir bei allen anderen Windrichtungen eine solche von dem etwa 8fachen Betrag der Bestandshöhe. Bestände mit unruhigem Kronendach (Plenter- und Mittelwald) haben eine etwas stärkere und weiterreichende Schutzwirkung als solche mit ebenem Kronendach. Auf dem geschützten Streifen nimmt das Ausmaß des Schutzes allmählich mit zunehmendem Abstand vom Bestandsrand ab: während in unmittelbarer Bestandsnähe eine Windgeschwindigkeit herrscht, die nur einen geringen Bruchteil der Freilandgeschwindigkeit beträgt, ist an der Grenze gegen das unbeeinflußte Freiland 90 bis 95 % der ungestörten Freilandgeschwindigkeit zu finden. Als Schutzzone wurde vom Verfasser das Gelände erklärt, das noch eine eindeutige Windabschwächung von 5 bis 10 % genießt.

Die Breite der Schutzzone gilt für die Windverhältnisse in 0,5 m über Boden — in größeren Höhen ist sie etwas geringer, in kleineren etwas größer — und für Windgeschwindigkeiten bis zu 5 m/sek. Höhere Windgeschwindigkeiten konnten nicht bearbeitet werden, weil sie während der Außenuntersuchungen nicht vorkamen; es ist aber anzunehmen, daß keine bedeutende Veränderung der Größe der Schutzzone bei höheren Windgeschwindigkeiten eintritt.

Neben den Messungen mit Schalenkreuzwindmessern wurden auch Beobachtungen mit künstlichen Rauchwolken gemacht. Dabei wurde nie die Ausbildung von Luv- oder Leewirbeln festgestellt. Während an luftundurchdringlichen Hindernissen Wirbel regelmäßig auftreten, gibt der immer etwas durchströmte Wald offenbar nicht die nötigen Voraussetzungen für diese Erscheinung.

Im Grenzgebiet zwischen Schutzzone und unbeeinflußtem Freiland war häufig ein schmaler, mit dem Bestandsrand gleichlaufender Streifen zu finden, über dem die Windgeschwindigkeit etwas größer war als auf dem Freiland: es ist dies die Zone, über der im Lee der vom Bestand her absteigende bzw. im Luv der zum Bestand hin aufsteigende Wind den Boden trifft. Das längs des Bestandsrandes liegende Luftkissen, das eine geringe Windgeschwindigkeit aufweist, bildet für den Freilandwind ein Hindernis, bei dessen Umströmung eine geringe Windgeschwindigkeitserhöhung auftritt. Dieser „Umströmungswind" von erhöhter Geschwindigkeit wird bei der gegebenen Versuchsordnung nur in Bodennähe erfaßt.

Windschutzwirkung von Rupfenwänden und Hecken

Von R. Geiger und dem Verfasser wurden (bisher unveröffentlichte) Untersuchungen an undurchlässigen, 1,50 m hohen und 60 m langen Rupfenwänden bei Badersfeld-Schleißheim durchgeführt. Grundsätzlich Neues hat sich dabei nur in einer Hinsicht ergeben: auf der Luvseite waren in Einzelfällen und auf der Leeseite regelmäßig walzen-

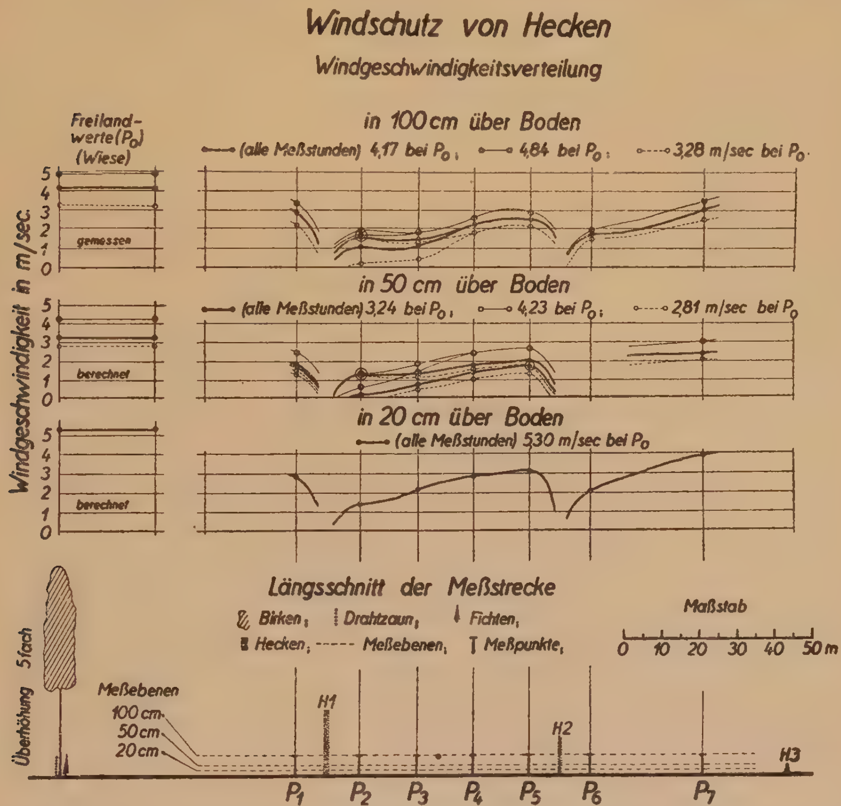


Abb. 12. Windgeschwindigkeitsverteilung im Bereiche einer Schutzanlage (Baum- und Heckenreihen) bei Badersfeld-Schleißheim. (Anm.: Aus: M. Woelfle, Hecken als Windschutzanlagen. Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1938, S. 22, Abb. 2)

förmige Wirbel festzustellen, die sich von Zeit zu Zeit ablösten und vom Winde weggetragen wurden und sich dann nach wenigen Sekunden neu bildeten. Die Breite der Schutzzone war gegenüber den bei dem Walde gefundenen Ergebnissen nicht wesentlich verändert: im Lee ungefähr gleich der 10- bis 12fachen, im Luv gleich ungefähr der 6- bis 8fachen Rupfenwandhöhe.

Die von der Moorwirtschaftsstelle Badersfeld-Schleißheim (Gartenbauinspektor Böhme) gegen Verwehungen der leichten Moorerde angelegten Lebensbaumhecken wurden vom Verfasser [siehe [46])] in ihrer Wirksamkeit untersucht. Abbildung 12 gibt einen Überblick über die gesamten Schutzanlagen (außer den Hecken befand sich im Westen

vorgelagert eine Reihe von Altbirken — zur Zeit der Untersuchung unbelaubt) und stellt zugleich auch die gewonnenen Ergebnisse dar. Alle Außenaufnahmen fanden bei westlichen Winden statt, die Hecken wurden demnach rechtwinklig oder fast rechtwinklig vom Winde angeströmt. Der völlig ungestörte Bezugspunkt P_0 lag ungefähr 250 m entfernt auf einer Wiese.

Die älteste Hecke (H_1; Höhe rund 3,40 m) war durch Düngung und Pflege so dicht gewachsen, daß sie für den Wind nicht durchdringbar war, sie wirkte ähnlich wie ein luftundurchlässiges Hindernis und wies deshalb im Lee einen sich von Zeit zu Zeit ablösenden Wirbel auf. Es ist dies der einzige Fall, in welchem vom Verfasser bei seinen zahlreichen Untersuchungen eine Wirbelbildung an Windhindernissen aus lebenden Holzgewächsen festgestellt werden konnte.

Die aus Abbildung 12 eingetragenen Windgeschwindigkeiten übersteigen auf der ganzen durch die Birkenreihe und die höchste Hecke geschützten Fläche nirgends 60 % der gleichzeitigen Freilandwerte; nur in der Nähe der niedrigen Hecken (rechte Seite der Abbildung) betragen sie 70 bis 75 %. Dabei ist es belanglos, ob die Messungen in 20, 50 oder 100 cm über Boden vorgenommen wurden; auch die Abschwächung des Windes in Hundertsteln der Geschwindigkeit des ungestörten Freilandwindes ist von der Geschwindigkeit des Freilandwindes innerhalb des Meßbereiches (2,8 bis 5,3 m/sek. bei P_0) fast unabhängig — Winde mit höherer Geschwindigkeit werden in Hundertsteln ausgedrückt nur um eine Kleinigkeit weniger abgebremst als solche mit geringerer. (Sind auf Abbildung 12 bei einer bestimmten Meßhöhe zwei Schaulinien von gleicher Strichart und -dicke eingetragen, so war dies durch die hohe Anlaufgeschwindigkeit der verwendeten Geräte bedingt: die vorkommende Geschwindigkeit liegt dann zwischen diesen beiden Grenzlinien.)

Die Windabbremsung durch die Altbirkenreihe und die Lebensbaumhecken (bei einer angestrebten Höhe von etwa 3,4 m bei allen drei, in 60 m Abstand senkrecht zur vorherrschenden Windrichtung verlaufenden Hecken) beträgt mindestens 40 % des Freilandwertes; die Anlage erfüllt in geradezu vollkommener Weise ihren Zweck.

Sturmschäden im Wald

Im Laufe der letzten Jahrzehnte ist die Erforschung der Sturmschäden von mehr allgemeinen Betrachtungen zur Untersuchung zahlreicher Einzelfälle übergegangen. Dieser Weg ist sehr erfolgversprechend, denn bei der großen Vielfältigkeit der Sturmbeschädigungen lassen sich Schutzmaßnahmen dagegen nur auf Grund der Beobachtung einer großen Zahl von Einzelschäden herausarbeiten und nicht an Hand allgemeiner Betrachtungen.

Besonders hervorzuheben sind vom forstlichen Standpunkt aus die Untersuchungen von Eifert[47]) und Bargmann[48]), die auf die grundlegende Bedeutung der Windablenkung durch Geländeausformung hingewiesen und eine Reihe waldbaulicher Maßnahmen aus-

[47]) Eifert, Forstliche Sturmbeobachtungen im Mittelgebirge. Allg. Forst- und Jagdzeitung, 1903, S. 323, 369 und 413.

[48]) B. Bargmann, Die Verteidigung und Sicherung der Wälder gegen die Angriffe und Gewalt der Stürme, unter besonderer Berücksichtigung der örtlichen Windablenkung. Allg. Forst- und Jagdzeitung, 1904, S. 81, 121, 161, 201 und 241.

gearbeitet haben zur Herabsetzung der Sturmschäden. Fritzsche[49]) hat insbesondere die Wind- und Sturmanpassung und die mechanischen Grundlagen bei Sturmwürfen untersucht. Eine Arbeit von H. Burger[50]) enthält u. a. einen besonders bemerkenswerten Abschnitt über verborgene Schäden (sog. Faserstauchungen) im Sturmwurfholz (wobei es sich bei den von ihm abgebildeten Rissen nach Ansicht des Verfassers auch auf der Leeseite wenigstens teilweise um ursprüngliche [primäre] Zug- und nicht um Druckrisse handelt.)

Vom meteorologischen Standpunkt aus hat A. Schmauß[51]) einen wertvollen Beitrag geliefert, indem er auf die Bedeutung der Richtungs- und Geschwindigkeitsböigkeit hinwies: Winde mit starken Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen sind wesentlich gefährlicher für den Wald als solche von gleicher durchschnittlicher Geschwindigkeit und mit kleineren Schwankungen.

Trotz des zahlreichen vorliegenden Schrifttums bestehen immer noch offene Fragen und weitverbreitete Irrtümer über die Entstehung und den Ablauf von Sturmbeschädigungen.

Vor allem muß gegen die vielfach vertretene Ansicht Stellung genommen werden, daß „Wirbel"stürme für einen nennenswerten Teil der Sturmverheerungen im Walde verantwortlich zu machen sind. Nach A. Wegener[52]) kommen in Europa jährlich etwa 100 Tromben vor (von ihm selbst ist diese Zahl als sehr unsicher bezeichnet); die Küsten sind von dieser Naturerscheinung mehr heimgesucht als das Binnenland. Die auf Deutschland treffende Anzahl Tromben ist jährlich demnach sehr gering und steht in keinem Verhältnis zu der großen Zahl der jährlich vorkommenden Sturmwürfe und -brüche. Die von Wegener aufgestellte jährliche Verteilung zeigt, daß von Oktober bis mit April Tromben äußerst selten sind (sie fallen zum größten Teil in die Monate Mai mit August, gleichlaufend mit der Gewitterhäufigkeit); im Walde treten dagegen Sturmverheerungen häufig im Herbst, Winter und Frühjahr auf. Bei den vom Verfasser untersuchten Sturmschäden im Walde (ungefähr 100) war nicht ein einziger durch Wirbelsturm verursacht.

Wirbelsturmbeschädigungen im Walde (in Europa) haben Seltenheitswert; sie sind im Verhältnis zu den anderen Sturmbeschädigungen von geringer wirtschaftlicher Bedeutung. Wir werden später sehen, auf welche Art die irrige Meinung über die größere Häufigkeit von zerstörenden Wirbelstürmen im Walde entstanden ist.

Drei Punkte wurden meines Wissens bisher bei allen Sturmschadenuntersuchungen nicht oder nicht genügend berücksichtigt:

1. die Sturmführung (Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen) durch Bestandsränder;
2. die in der Natur gegebene Windgeschwindigkeitszunahme mit der Höhe über Boden; die Windgeschwindigkeit nimmt mit der 4. bis 7. Wurzel aus der Höhe zu (so entspricht z. B. einer Geschwindigkeit von 10 m/sek. in 1 m Höhe eine

[49]) K. Fritzsche, Sturmgefahr und Anpassung. Mitteilungen aus der Sächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 1933, Heft 1.

[50]) H. Burger, Sturmschaden. Mitteilungen der Schweizer Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen, 1932, Heft 2.

[51]) A. Schmauß, Über Sturmgefährdungen. Forstwiss. Zentralbl., 1920, S. 189.

[52]) A. Wegener, Wind- und Wasserhosen. Braunschweig, 1917.

solche von 20 bis 22 m/sek. in 25 m Höhe; Fritzsche [siehe [49])] erwähnt zwar diese Tatsache, in Rechnung gestellt wird sie jedoch von ihm nicht);

3. der Rhythmus des Sturmes. Die zeitlich in kürzeren oder längeren Abständen erfolgenden Sturmstöße führen besonders dann zu schweren Schäden, wenn sie mit der Schwingungszeit der Eigenschwingung der Stämme übereinstimmen. Auf diese wichtige Tatsache hat A. Schmauß hingewiesen.

Der vielfach gefundene Tatbestand, daß unter Erhaltung der Bestandsränder unmittelbar anschließend im Bestandsinnern, und zwar auf der Luv- und Leeseite, Sturmschäden auftreten, hat bis heute keine einwandfreie Erklärung gefunden; auch die Ansicht, daß die hinter Wind stehenden Nachbarstämme die frei dem Winde ausgesetzten stützen, befriedigt nicht. Auch vom Verfasser konnte nur ein Erklärungsversuch in dieser Richtung unternommen werden, ein Beweis ist nicht möglich, da die Strömungsverhältnisse über dem luv- und leeseitigen Bestandsrand noch nie eingehend und genau untersucht wurden. Solange Untersuchungen darüber nicht vorliegen, wird eine eindeutige Beantwortung dieser Frage — trotz der zahlreichen Erörterungen — nicht möglich sein. Als Versuchsanordnung kämen entweder ausgewogene Ballone oder Rauchbeobachtungen in Frage.

An Getreidefeldern sind häufig ganz ähnliche Sturmbeschädigungen zu beobachten wie im Wald: rings am Rande der Felder steht ein schmaler Streifen Getreide aufrecht, während auf der ganzen übrigen Fläche die Halme durch Sturm oder Regen niedergelegt sind.

Aus der umfangreichen Untersuchung des Verfassers über Sturmschäden[53]) sollen nur drei Punkte herausgegriffen werden: a) Sturmführung durch Geländeausformung, b) Sturmführung an Bestandsrändern und c) Sturmgefährdung und Bestandsaufbau, Bestandsverfassung und Einfluß benachbarter Bestände. Im übrigen muß auf die genannte Arbeit verwiesen werden.

Sturmführung durch Geländeausformung

Nur für vollständig ebenes Gelände sind die für großräumige Verhältnisse bestimmten Angaben der Klimastationen über Windrichtung und Windgeschwindigkeit maßgebend. In bergigem oder hügeligem Gelände wird die Windrichtung durch die Bodenausformung abgewandelt (besonders durch Täler), und auch die Windgeschwindigkeit kann dadurch wesentlich geändert werden. Die genaue Richtungsänderung kann durch Beobachtung örtlich leicht festgestellt werden; dem Wirtschafter bereitet die Bestimmung der Richtungsablenkung keinerlei Schwierigkeiten.

Auf Abbildung 13 sind an Hand eines im Oberpfälzer Grenzgebirges vorgekommenen Sturmwurfes die durch Sturmablenkung und -führung bei a, b und f entstandenen Schäden deutlich zu erkennen. Im vorstehenden Fall ist eine Richtungsänderung von ungefähr 45 Grad eingetreten; es besteht aber die Möglichkeit, daß bei geeigneter Geländeausformung Richtungsänderungen von über 90 Grad vorkommen. Der von einem Tal geführte („gefangene") Sturm paßt sich dessen Windungen weitgehend an, durchströmt es mit hoher Geschwindigkeit und verschafft sich am Talende oder bei zu scharfen Windungen mit großer Gewalt einen Ausweg.

[53]) M. Woelfle, Sturmschäden im Walde. Forstw. Centralbl., 1936, S. 605; 1937, S. 77 und S. 565.

Trifft waagerecht ankommender Sturm auf eine Bodeneinsenkung, so schmiegt er sich nicht gleich dem geneigten Gelände an, sondern er strömt noch ein Stück waagerecht weiter und senkt sich erst dann. Auf der Windschattenseite der Bodeneinsenkung ist ein Teil des Hanges nicht oder nur wenig sturmgefährdet. Der den Muldenkamm überströmende und dann absteigende Luftstrom trifft an einer Stelle wieder den Boden und kann dort als Überfallwind große Verheerungen anrichten. Die Größe der leewärts des Muldenkammes geschützten Fläche ist nach Bodenausformung und Sturmgeschwindigkeit verschieden. In mehreren Fällen wurde vom Verfasser bei einer Geländeneigung von etwa 20 Grad eine Breite des Leeschutzes von 150 bis 200 m beobachtet. Im allgemeinen dürfte die Breite der Leeschutzzone mit der Neigung des Hanges

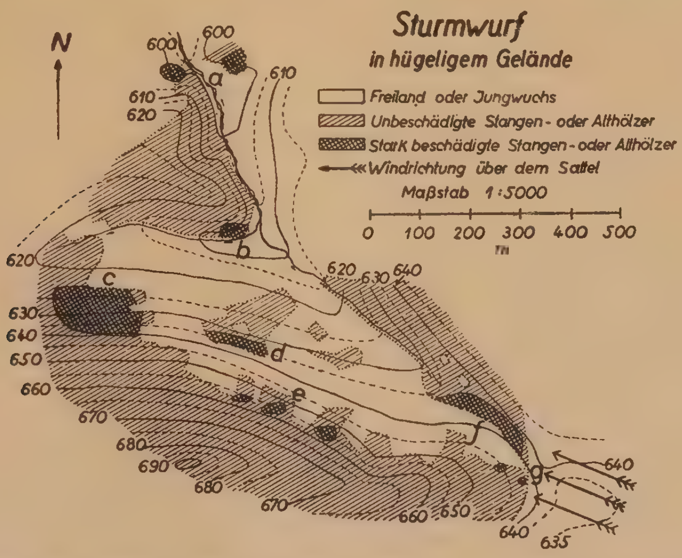


Abb. 13. Sturmbeschädigungen durch Sturmführung: a, b, f durch Geländeausformung; c und d an vorgelagerten Beständen bzw. an einen Bestandsrand; e an zwei Bestandsrändern. (Anm.: Aus: M. Woelfle, Sturmschäden im Wald. Forstwissenschaftliches Zentralblatt 1937, S. 78, Abb. 1)

zunehmen, damit wächst aber auch die Wucht des Überfallwindes, d. h. wenn Abflußmöglichkeit für den Überfallwind gegeben ist (breite Täler oder Seitentäler auf der gegenüberliegenden Luvseite des Tales).

Ragt eine Bodenerhebung von beachtlicher Höhe aus ebenem Gelände empor, so trifft ankommender Sturm den Fuß der Erhebung mit großer Wucht (Geschwindigkeitserhöhung durch Zusammendrängen der Stromlinien und außerdem starke Durchwirbelung am Hindernis), und zwar besonders dann, wenn die Bodenerhebung eine größere Längenausdehnung senkrecht zur Sturmrichtung hat. An kleineren kegelförmigen Bergen, z. B. dem Hohen Karpfen, ist die Möglichkeit der Umströmung gegeben, die Gefährdung des Bergfußes ist deshalb nicht sehr groß. Am luvseitigen Geländeknick einer Bodenerhebung entstehen häufig Sturmverheerungen, die ein Stück weit hangaufwärts reichen, aber selten bis zur Kammlinie hinauf durchgreifen: hat

sich der Sturm nach dem Geländeknick dem ansteigenden Gelände angepaßt, so hören die Beschädigungen häufig auf. Im Gebiete der Kammlinie ist manchmal ein zweites Wurf- und Bruchgebiet — unabhängig vom ersten — zu finden, es wird verursacht durch die erhöhte Geschwindigkeit (Zusammendrängen der Stromlinien), mit der die Kammlinie überströmt wird. Die Leeschutzzone auf der Windschattenseite ist bei einer Bodenerhebung breiter als bei einer Bodeneinsenkung, weil das Herabströmen des Sturmes nach der Kammlinie eines Berges weniger stark geneigt erfolgt. Der Wind über der Kammlinie einer Bodenerhebung steigt noch etwas und strömt nicht schon — wie bei einer Mulde — waagerecht. Die breitere Schutzzone auf der Windschattenseite eines Berges bringt allerdings eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit des Überfallwindes und damit der Sturmgefährdung im Vergleich zu den bei der Mulde gefundenen Verhältnissen mit sich.

Sturmführung an Bestandsrändern

Die erhöhte Sturmgefährdung bei einspringenden Winkeln in der Wald-Freilandgrenze ist in Forstkreisen allgemein bekannt. Trifft der Sturm in ungefähr gleichem Winkel auf die beiden Bestandsränder des einspringenden Winkels, so strömen große Luftmassen längs der Bestandsränder — sie werden von ihnen geführt — und stoßen unter starker Durchwirbelung am Schnittpunkt der beiden Schenkel zusammen: eine kleinere und größere meist eiförmige Wurf- und Bruchfläche (Abb. 13, e) ist die Folge dieser ungünstigen Abgrenzung von Wald gegen Freiland, die eine Erhöhung der Sturmgeschwindigkeit verursacht.

Strömt der Wind in einen einspringenden Winkel der Wald-Freilandgrenze unter einem spitzen oder sehr spitzen Winkel zu einem Bestandsrand (und einem größeren oder rechten zum anderen), so übernimmt der erstere allein oder fast allein die Sturmführung. In der Nähe des Schnittpunktes der beiden Schenkel kommt es nicht zu der starken Durchwirbelung wie im vorhergehenden Falle, sondern der geführte Sturm trifft ungestört und mit voller Wucht auf den anderen Bestandsrand auf: meist reißt er dann eine lange und schmale Gasse in den Bestand (Abb. 13, c; hier jedoch teils auch durch Sturmführung an vorgelagerten Beständen verursacht). Diese Gasse bildet nicht die Fortsetzung des sturmführenden Bestandsrandes, sondern sie ist ein Stück gegen das Freiland hin versetzt: in unmittelbarer Nähe des sturmführenden Bestandsrandes findet sich eine Bremszone, die in den vom Beobachter untersuchten Fällen 50 bis 80 m breit war.

Die Sturmführung kann auch von den Rändern vorgelagerter Bestände übernommen werden: ein oder zwei Bestandsränder übernehmen die Führung des Sturmes und gefährden so einen dahinterliegenden Bestand (Abb. 13, d und teilweise c). Besonders verheerende Schäden können entstehen, wenn zwei Bestandsränder den Sturm wie durch eine Düse auf einen dahinterliegenden Bestand zusteuern.

Die Führung des Sturmes durch Bestandsränder (Richtungsänderung und Geschwindigkeitserhöhung) war in vielen Fällen der Anlaß zur Entstehung der irrigen Anschauung, daß Wirbelstürme für die Verheerungen im Walde verantwortlich zu machen seien. Die sich während des Wurfes ständig ändernden Bestandsränder auf der Wurffläche verursachen auch sich ändernde Sturmrichtungen und bewirken ein Wurfbild, das

an einen Wirbelsturm erinnern kann, jedoch nicht das geringste damit zu tun hat. Neben der genannten Erscheinung können bei der Entstehung der unregelmäßigen Lage des Wurf- und Bruchholzes auch andere Ursachen mitwirken: Drehung der Sturmrichtung (bedingt durch das Großwettergeschehen, z. B. im Verlaufe von einigen Stunden von Südwest auf Nordwest), ungleich starke Bewurzelung der verschiedenen Seiten eines Stammes, Aufeinanderstürzen und Abrutschen bzw. Umdrücken benachbarter Stämme und ungleiche Kronenausbildung.

Sturmgefährdung und Bestandsrand, Bestandsaufbau, Bestandsverfassung und Einfluß benachbarter Bestände

Eine durch Untersuchungen belegte Erklärung für die Tatsache, daß häufig bei Sturmschäden der Bestandsrand unversehrt erhalten bleibt, während dahinter größere oder kleinere Flächen kahl geworfen oder gebrochen werden, kann vom Verfasser nicht gegeben werden. Neben der Sturmgewöhnung der Randbäume, die zweifellos eine große Rolle spielt, müssen auch noch andere Einzelkräfte von ausschlaggebender Bedeutung sein, denn vom Verfasser wurde eine Reihe von Sturmbeschädigungen beobachtet, bei welchen die Randbäume erhalten blieben, obwohl es sich dabei um Stämme handelte, die bis vor wenigen Jahren im Bestandsinneren standen und nur durch Entfernung der angrenzenden Bestandsteile zu Randbäumen gemacht wurden. Eine Sturmanpassung kommt in diesen Fällen nicht in Frage, auch nicht eine Erhaltung der sturmfesteren Einzelstämme, weil die Beschädigungen streifenweise erfolgt waren.

Nach Ansicht des Verfassers sind neben der — in den meisten Fällen — größeren Sturmfestigkeit der Randstämme die am Bestandsrand eintretenden Strömungsverhältnisse von großer Bedeutung: der zum Aufsteigen gezwungene Sturm trifft zwar mit großer Wucht die Randbäume, diese können aber von ihm umströmt werden und außerdem haben sie die Möglichkeit, frei auszuschwingen. Die an die Randbäume angrenzenden Kronen können nicht mehr umflossen werden, weil hier die Masse der Kronen ein fast undurchdringbares Hindernis bildet (Umströmung ist nicht mehr möglich). Die Kronen der Stämme hinter den Randbäumen haben den ganzen Sturmdruck auszuhalten, der auf sie trifft. Zu dieser Beanspruchung kommt noch zusätzlich der über die Randbäume auf die nächsten Kronenreihen herabströmende Sturm. Die Beschädigungen auf der Leeseite von Beständen — unter Erhaltung der Randstämme — lassen sich auf die gleiche Weise erklären, nur kommt hier an Stelle der obengenannten Zusatzbeanspruchung der Soog durch die Randbäume auf der Leeseite hinzu.

Einzelne, in größerem Abstand stehende, breitkronige und sturmfeste Stämme im Zuge eines sonst weniger sturmfesten Bestandsrandes wirken sehr ungünstig: sie halten zwar stand, werden aber an den Kronenseiten mit so großer Geschwindigkeit umströmt, daß die benachbarten, weniger sturmfesten Randstämme geworfen werden. Mit unbedingter Sicherheit wird ein Bestandsrand von einem Sturm auf den schwächsten Punkt hin geprüft. Einige wenige sturmschwächere Stämme — unter Umständen ein einziger — können die erste Ursache für die Zerstörung eines Großteils des Bestandes sein.

Voll bestockte Bestände wurden vom Verfasser immer ziemlich sturmfest gefunden, wenn sie mit einem sturmfesten

Mantel versehen waren. Entsteht jedoch in einem solchen Bestand auch nur eine kleine Lücke, so kann von diesem Ausgangspunkt aus Sturmwurf und -bruch angreifen: der vollbestockte Bestand geht aus einem sturmfesten in einen sturmgefährdeten über, denn die Einzelstämme sind auch nicht an einen teilweisen Freistand gewöhnt. Da die Gefahr von einzelnen Ausfällen im Laufe der Umtriebszeit immer gegeben ist (Rotfäule, Kerbtiere, Schneedruck, Blitzschlag, Frevel), ist es bei gegebener Sturmgefährdung ratsam, die Bestände durch frühzeitige und regelmäßige Durchforstungen aufzulockern.

Von Jugend auf regelmäßig mittel bis stark durchforstete Bestände erweisen sich ebenfalls als ziemlich sturmfest. Diese Art der Bestandserziehung in sturmgefährdeten Gegenden bietet den großen Vorteil, daß der Ausfall von einem oder von einigen Stämmen durch Naturereignisse nicht zum Ausgangspunkt einer Sturmbeschädigung wird, weil die locker stehenden Stämme sich im Laufe ihrer Entwicklung an größere Sturmbeanspruchung gewöhnt haben.

Plötzliche, starke Eingriffe in den Hauptbestand bringen immer starke Sturmgefährdung mit sich, dabei ist es ohne Bedeutung, ob diese Maßnahmen in Stangenhölzern oder in haubaren Beständen vorgenommen werden.

Unter- und Zwischenstand sind für die Sturmfestigkeit nicht ohne Bedeutung: mehrfach wurde vom Verfasser beobachtet, daß Sturmbeschädigungen nur soweit reichten, als Unter- und Zwischenstand entfernt worden waren.

Über einem einheitlichen, ebenen Kronendach strömt der Sturm mit sehr großer Geschwindigkeit: einzelne, auch nur wenige Meter herausragende Bäume können gebrochen oder geworfen werden, obwohl nicht ihre ganze Krone dem Sturme ausgesetzt ist.

Ein lückiger Bestand ist besonders dann gefährdet, wenn die einzelnen Lücken in Richtung des Sturmes hintereinander liegen oder der Bestand nicht mit sturmfesten Einzelstämmen dicht durchsetzt ist. Ein Sturmbock schützt einen leewärts anschließenden Bestandteil, dessen Länge ungefähr 30 bis 50 m beträgt und dessen Breite von der einfachen Kronenbreite in der Windrichtung bis zur 2- bis 3fachen zunimmt.

Ist einem höheren Bestand im Luv ein wesentlich niedrigerer mit einheitlicher Kronenoberfläche vorgelagert, so wird dadurch die Sturmgefährdung für den höheren Bestand vergrößert, weil die Sturmgeschwindigkeit über dem niedrigen Kronendach beachtlich höher ist als in gleicher Höhe über Freiland.

In diesem Zusammenhang soll auch auf einen verborgenen Schaden hingewiesen werden, der durch stärkeren Wind oder Sturm verursacht wird. So günstig die Bodenlockerung durch die Wurzeln beim Pendeln der Bäume durch den Wind ist, so ungünstig können sich Wurzelzerreißungen auswirken: E. Rohmeder[54]) hat darauf hingewiesen, daß Wurzelverletzungen der Anlaß für Pilzbefall (Wurzelfäule) sein können. Fällt ein wurzelfauler Stamm nach einer Reihe von Jahren nach seinem Befall dem Sturm zum Opfer, so kann die entstandene Lücke der Ausgangspunkt für größere Sturmbeschädigungen sein.

---

[54]) E. Rohmeder, Die Stammfäule der Fichte. Mitteilungen aus der Landesforstverwaltung Bayerns, 1937, Heft 23.

Wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund der Wind- und Sturmuntersuchungen des Verfassers

Verringerung der schädlichen Kleinarbeit des Windes

Das Eindringen des Windes in das Bestandsinnere und besonders sein Durchgreifen mit erhöhter Geschwindigkeit auf den Boden der Bestandsrandzone kann verhindert werden bzw. stark herabgesetzt werden durch:

1. Sorgfältige Erhaltung eines dichtgeschlossenen Bestandsmantels auf allen Seiten;
2. Anlage und Erhaltung von Strauchwerk an Stellen, an welchen der Bestandsmantel nicht bis zum Boden herabreicht;
3. Belassung von möglichst viel Unter- und Zwischenstand in der Nähe der Bestandsränder (der den Bestandsmantel durchdringende Wind wird dann durch den Nebenbestand abgebremst).

Einige andere Maßnahmen werden im nächsten Abschnitt (Verdunstung) ausführlich besprochen, denn der vom Winde verursachte Wasserverlust ist der bedeutungsvollste Schaden, den die Kleinarbeit des Windes bewirkt.

Windschutzanlagen

Nicht nur in der Forstwirtschaft, sondern auch in der Landwirtschaft kann die Schaffung von Windschutzanlagen notwendig werden, um die schädlichen Wirkungen, die regelmäßig oder häufig wehender mittlerer bis starker Wind auf das Pflanzenwachstum ausübt, zu verhindern.

Auf Abbildung 14 ist eine vereinfachte Einzelanlage dargestellt, die vom Verfasser für die Rhönbesiedlung (Dr. Hellmuth-Plan) auf Grund seiner zahlreichen Untersuchungen auf diesem Gebiete entworfen wurde. Diese Windschutzanlage dürfte in ebenem Gelände eine Geschwindigkeitsherabsetzung gegenüber ungestörten Freilandverhältnissen um 40 % bei Geschwindigkeiten bis zu 10 m/sek. bewirken. Diese Größenangabe der Windabschwächung gilt für die Schicht vom Boden bis in zwei Meter Höhe. Voraussetzung für diese starke Windabbremsung ist, daß Hecken und Waldstreifen die angestrebte Höhe erreicht haben: die mittlere Höhe der Waldstreifen ist mit 15 m und die der Hecken mit 4 bis 5 m eingesetzt. Laubhölzern ist dabei gegenüber Nadelhölzern unbedingt der Vorzug zu geben (s. unten).

Die Schutzanlage muß so errichtet werden, daß sie mit der Längsseite rechtwinklig zur vorherrschenden Windrichtung steht. In hügeligem oder bergigem Gelände müssen die Stellen, die stark dem Winde ausgesetzt sind (Luvseite und Flanken von Bodenerhöhungen, Zone des Überfallwindes und Hänge windsteuernder Täler), durch Zusammendrängen der Wald- und Heckenstreifen auf etwa zwei Drittel der dargestellten Werte besonders geschützt werden.

Die Waldstreifen haben eine Breite von 30 bis 50 m, damit die Windschutzwirkung durch Lücken nicht verringert wird, wenn durch Naturereignisse oder anläßlich der notwendigen Verjüngung einzelne Stämme entnommen werden. Die Bewirtschaftung der Streifen erfolgt am zweckmäßigsten in plenterartigem Betriebe. Den Hecken soll nur ein schmaler Bodenstreifen zur Verfügung gestellt werden (1 bis 2 m); durch Beschneiden der oberirdischen Teile kann ein zu starkes Breitenwachstum verhindert werden. Der im unmittelbaren Leeschutz des Waldes gelegene Heckenstreifen kann — sofern es aus

wirtschaftlichen Gründen erforderlich ist — dann entfernt werden, wenn der Wald eine Höhe von etwa 10 m erreicht hat.

Als Schutzholzarten kommen für die Heckenanlage nur Laubhölzer in Frage; auch in den Waldstreifen ist ihnen unbedingt der Vorzug vor den Nadelhölzern zu geben. Es hat sich nämlich gezeigt, daß etwas winddurchlässige Anlagen das angrenzende Gelände mehr schützen als ganz dichte und für den Wind praktisch undurchdringbare. Laubhölzer verursachen weiterhin keine so hohen Schneeablagerungen im unmittelbaren Lee der Schutzstreifen, weil sie im Winter gut vom Winde durchströmt werden können,

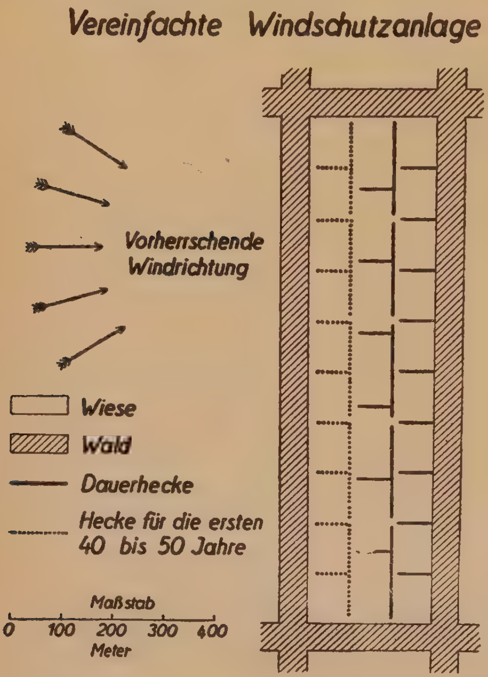


Abb. 14. Anordnung von Wald- und Heckenstreifen zum Schutze des eingeschlossenen Geländes gegen den Zutritt des Windes (Windabbremsung über der ganzen Fläche mindestens 40% des Freilandwertes). (Anm.: Aus: M. Woelfle, Windschutzanlagen. Forstwiss. Zentralbl., 1938, S. 82, Abb. 10)

und außerdem gelangt die Sonnenstrahlung im Winter und Frühjahr (vor der Belaubung) in und an den Laubholzschutzstreifen bis zum Boden und erwärmt ihn, während der Vollschatten von Nadelhölzern diese erwünschte Erwärmung hintanhält.

Da nach Neuanlage der Schutzstreifen mehrere Jahrzehnte vergehen bis ein bemerkenswerter Windschutz eintritt, ist es zur Erlangung schnell wirksamer Schutzanlagen zweckmäßig, weitere Heckenstreifen anzulegen, die dann entfernt werden können, wenn sie nach dem Heranwachsen der Gesamtanlage nicht mehr notwendig sind. Werden die Windschutzanlagen auf hochwertigem landwirtschaftlichem Grunde angebracht, so sind die am wenigsten wertvollen Bodenstellen für Wald- und Heckenanpflanzungen auszuwählen, auch wenn dadurch die Form der ganzen Anlage etwas verändert wird.

Vorbeugung gegen Sturmschäden

Die in den Klimawerken niedergelegten Werte der durchschnittlichen und höchsten Windgeschwindigkeiten und der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen sind in ebenem Gelände nur mit Einschränkung und in hügeligem und bergigem überhaupt

nicht als Grundlage für Maßnahmen gegen Sturmschäden geeignet. Selbst wenn die Gliederung (Struktur) der Windgeschwindigkeit für jede Windrichtung genauestens bekannt ist (einschließlich Böigkeit und Spitzenwerte), kann daraus noch nicht geschlossen werden, welche Richtung die für den Wald gefährlichsten Stürme haben: häufig wehenden Winden und Stürmen aus einer Richtung passen sich Einzelstämme und Bestände an, und sie halten deshalb auch aus dieser Richtung ohne Schaden zu erleiden Geschwindigkeiten aus, die aus „ungewohnter" Richtung schwere Schäden verursachen können. In hügeligem oder bergigem Gelände ist die Beachtung der örtlichen Sturmablenkung für alle Schutzmaßnahmen gegen Sturmgefährdung ausschlaggebend.

Bei vorhandener Gefahr soll jeder Bestand ringsum mit einem sturmfesten Saum umgeben werden; ein sturmfester Bestandsmantel genügt nicht, denn bei Ausfall auch nur eines einzigen Randstammes kann der Sturm unter Umständen in den Bestand eingreifen und sein Zerstörungswerk beginnen. Erst bei Einleitung der Verjüngung bzw. beim Abtrieb wird der Bestand von einer oder zwei Seiten her geöffnet. Ist in den letzten Jahrzehnten vor der Verjüngung planmäßig auf Sturmfestigung des Bestandsinneren hingearbeitet worden, so werden die Sturmbeschädigungen am Schirmbestand während der Verjüngung erträglich sein (ganz sind sie nie zu vermeiden). Die Verjüngung wird zweckmäßig gegen die Hauptsturmrichtung vorgetrieben; dabei kann jedoch nicht genug betont werden, daß eine genaue und eindeutige Festlegung der Hauptsturmrichtung überhaupt nicht möglich ist. Viel wichtiger als die Erörterung über die Hauptsturmrichtung und den genauen Verlauf der Wege und Anhiebslinien hierzu ist die Schaffung von sturmfesten Bestandssäumen nach allen Richtungen. Durch diese Maßnahmen soll vor allem vermieden werden, daß der Sturm in frohwüchsige Stangenhölzer oder angehend haubare, zuwachsreiche Bestände Eingang findet und noch nicht hiebsreifes Holz wirft und bricht. In haubaren oder überalten Beständen, die ja erzwungenermaßen von mindestens einer Seite her geöffnet werden müssen (bei den meisten Verjüngungsverfahren), ist der Schaden nie so groß wie im vorhergehenden Fall. Die Verjüngung von innen heraus — ohne Saumhieb — verhindert den Eintritt des Sturmes wohl eine Zeitlang, aber der Schutz durch den stehenbleibenden Saum wird mit dem Fortschreiten der Verjüngung immer geringer.

Als Einzelmaßnahmen sind in sturmgefährdeten Gebieten zu empfehlen:

1. Feststellung der durch Geländeausformung und Führung an Bestandsrändern geänderten Sturmrichtungen (laufender Eintrag aller Sturmwürfe in eine Wirtschaftskarte);
2. Schaffung eines zwei Stammhöhen breiten sturmfesten Bestandssaumes auf allen Seiten von jedem Bestand.
3. Frühzeitige, regelmäßige mittlere bis kräftige Durchforstungen;
4. Beseitigung aller einspringenden Winkel innerhalb des Verlaufes der Wald-Freilandgrenze, oder, sofern dies auf dem Wege der Besitzabrundung nicht möglich ist, besondere Festigung der von den Winkelpunkten ausgehenden Bestandsränder nach beiden Seiten in einer Erstreckung der etwa 6fachen Bestandshöhe durch Anlage sturmfester Bestandssäume;

5. Vermeidung des Aufkommens vereinzelt stehender, breitkroniger und sehr sturmfester Protzen innerhalb eines nicht ganz sturmfesten Bestandes oder Bestandsrandes;
6. Kräftige Hochdurchforstung einige Jahrzehnte lang vor Beginn der Bestandsöffnung (Verjüngung), um die Einzelstämme allmählich etwas an Freistand zu gewöhnen. Die stärksten Stämme in einem dichtgeschlossenen Bestand (mit einigermaßen einheitlichem Kronendach) sind ohne entsprechende Erziehung nicht sturmfester als die benachbarten schwächeren; besonders wenn sie infolge ihres rascheren Wachstums rotfaul sind (Fichte);
7. Bei Anlage von Gruppen muß vermieden werden, daß mehrere in näherem Abstand geradlinig hintereinander liegen, weil sonst die dazwischenstehenden Altholzbänder leicht vom Sturme geworfen werden;
8. Ein einheitliches, ebenes Kronendach eines höheren Bestandes soll nicht von den Kronen vereinzelter, vorgewachsener Stämme überragt werden, denn für diese herausragenden Einzelstämme besteht die Gefahr, daß sie durch den vom Kronendach geführten Sturm herausgepflückt werden. Bei allgemein unruhigem Kronendach (Plenterwald) ist diese erhöhte Gefahr nicht gegeben.
9. Langsames und stetiges Ansteigen des Kronendaches vom Freiland gegen das Innere des Waldes. Im Luv vorgelagerte niedrigere Bestände mit einheitlichem Kronendach erhöhen die Sturmgefährdung für die leewärts liegenden höheren, wenn die Kronenoberflächen stufenförmig ansteigen.
10. Schaffung plenterwaldähnlicher Bestände an Stelle von schlagweisem Hochwald;
11. Verjüngung von innen heraus ohne Saumhieb.

VII. Verdunstung

Unter Verdunstung versteht man den Übergang eines Stoffes vom festen bzw. flüssigen Zustand in den gasförmigen: im Walde erfolgt die Verdunstung des Wassers 1. auf dem Wege durch Forstpflanzen bzw. forstliche Unkräuter — in diesem Fall ist das Wasser Beförderungsmittel für die Nährsalze gewesen —, 2. unmittelbar aus dem Boden und 3. von dem flüssig oder fest vorhandenen Wasser, das an der oberirdischen Oberfläche von Pflanzen- bzw. Streubestandteilen haftet (nach Regen, Schneefall oder Taubildung).

Der unmittelbare Übergang vom festen in den gasförmigen Zustand des Wassers (Verdunstung von Schnee und Eis) kann für die vorstehende Betrachtung außer acht gelassen werden, weil er in unserem Klima zur Wachstumszeit mengenmäßig im Vergleich zur Verdunstung des flüssigen Wassers eine untergeordnete Rolle spielt.

Die Menge des Wassers, die von den Forstpflanzen unter den verschiedenen meteorologischen Bedingungen verbraucht wird, soll hier nicht untersucht werden, weil es sich dabei um vorzüglich physiologische Fragen handelt, die schon eingehend bearbeitet wurden [u. a. von K. Fritzsche[55])].

In Abschnitt IV wurde nachgewiesen, daß eine nennbare Vermehrung des Niederschlages im Walde nicht möglich ist. **Von größter Bedeutung ist daher, daß ein möglichst hoher Anteil des Gesamtniederschlages den Forstpflanzen zur Verfügung steht, oder mit anderen Worten, daß die unmittelbare Verdunstung aus dem Boden und von dem äußerlich an den Pflanzen und den Streubestandteilen haftenden Wasser möglichst herabgedrückt wird.** Hier wird nur dieser letztgenannte Wasserverlust durch Verdunstung behandelt.

Im folgenden wird unter Verdunstung diejenige Wassermenge verstanden, die in der Zeiteinheit je Flächeneinheit unter den verschiedenen meteorologischen Bedingungen in den gasförmigen Zustand übergeht. Da genaue Mengenbestimmungen bei der Schwierigkeit, die Verdunstungsvorgänge rechnerisch zu erfassen, nicht möglich sind und außerdem vom Verfasser keine Verdunstungsmessungen vorgenommen wurden, werden keine Absolut- sondern Vergleichszahlen genannt.

Die Verdunstung ist abhängig von der Windgeschwindigkeit, dem Dampfhunger der Luft, der Temperatur des Wassers (bzw. der verdunstenden feuchten Oberfläche) und dem Luftdruck. Der Einfluß des Luftdruckes ist so gering, daß er dann vernachlässigt werden kann, wenn die Luftdruckunterschiede nicht beträchtlich sind. Bei Vergleich der Verdunstung in Hochlagen gegenüber Tieflagen muß er allerdings in Rechnung gestellt werden (die Verdunstung steigt im Verhältnis der Luftdruckabnahme; der dadurch erhöhte Feuchtigkeitsverlust wird jedoch in den meisten Fällen durch die mit der Höhe zunehmenden Niederschläge bzw. durch die niedrigere Temperatur ausgeglichen — für deutsche Verhältnisse).

[55]) K. Fritzsche, Physiologische Windwirkung auf Bäume. Neumann, Neudamm, 1929.

Einfluß der Windgeschwindigkeit

Eine zusammenfassende Darstellung des Einflusses des Windes auf die Verdunstung im Walde hat E. Münch[56]) gegeben, allerdings ohne näher auf das Verhältnis des Ansteigens der Verdunstung bei zunehmender Windgeschwindigkeit einzugehen. Mathematisch genau ist die Verdunstung nur schwer oder überhaupt nicht formelmäßig zu bestimmen; mit genügender Annäherung steigt die Verdunstung unter sonst gleichen Bedingungen mit der Wurzel aus der Windgeschwindigkeit an (so verdunstet z. B. bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/sek. die doppelte Menge wie bei einer Geschwindigkeit von 1 m/sek.). *Aus dieser Gesetzmäßigkeit kann die außerordentlich große Bedeutung des Windeinflusses auf die Austrocknung windausgesetzter Örtlichkeiten ermessen werden.*

Die durch Geländeausformung, Bestandsaufbau und -verfassung örtlich und kleinörtlich abgewandelten Windverhältnisse (s. Abschnitt VI) wirken stark auf die Verdunstung ein. *Angaben über die sehr wichtige Größe des Luftaustausches können vom Verfasser leider nicht gemacht werden; aber da der Luftaustausch durch Wärmeeinstrahlung um so größer ist, je lockerer die Bestände sind, ist die Verdunstung über die gefundenen Windgeschwindigkeiten hinaus in lockeren Beständen noch weiter vergrößert. Bei der Beurteilung der Verdunstung darf nicht nur die in der Waagerechten gemessene Windgeschwindigkeit in Betracht gezogen werden, sondern auch der Luftaustausch;* dies ist bis jetzt meines Wissens nie geschehen.

Die Windwirksamkeit (= Windgeschwindigkeit mal Häufigkeit) kann nicht ohne Einschränkung als Grundlage bei Berechnung der Verdunstung verwendet werden, denn niederschlagbringende Winde spielen für die Verdunstung keine Rolle. Die Windwirksamkeit in bezug auf die Verdunstung muß unter Ausscheidung jener Winde erfolgen, die während eines Niederschlages wehen oder die so feuchte Luftmassen bewegen, daß keine oder nur eine ganz geringe Verdunstung erfolgt.

Eine Untersuchung des Verfassers über Verhagerungserscheinungen [siehe [42])] hat ergeben, daß durch die erhöhte Windgeschwindigkeit, die bei Umströmung eines Überhälters bzw. bei Einströmung in einen schlecht bemantelten Bestandsrand in Bodennähe auftritt, dem Boden auf dem Wege der Verdunstung beachtliche Wassermenge entzogen werden können. Abbildung 15 zeigt die Verdunstungsverhältniszahlen in der Umgebung einer einzelstehenden Hutbuche auf der Hohen Rhön bei einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 2,6 m/sek. in 50 cm Höhe über ungestörtem Freiland. Einer ganz kleinen Leeschutzzone (mit nur 88 % der Verdunstung über Freiland) steht eine *rings* um den Baum liegende große Fläche gegenüber, die 106 bis 128 % der Freilandsverdunstung aufweist. *Bei freigelegtem Boden beruhen Verhagerungserscheinungen zum weitaus größten Teil auf der erhöhten Verdunstung aus dem Boden.* Andere Einzelkräfte können bei Verhagerung mitwirken (Wasserentzug durch die Altstämme, Traufwirkung, Besonnung des Bodens, Wärme- und Lichtrückstrahlung vom Stamm usw.); ausschlag-

---

[56]) E. *Münch*, Windschutz im Walde. Forstliche Wochenschrift Silva, 1923, S. 1.

gebend können sie deshalb nicht sein, weil bei Bodendeckung die Verhagerungserscheinungen stark zurückgehen oder ganz verschwinden, obwohl durch diese Maßnahme im wesentlichen nur die Windverhältnisse in Bodennähe geändert werden (der Wind wird abgebremst und kann nicht mehr bis auf die Bodenoberfläche durchgreifen), während die anderen Einwirkungen fast unverändert bestehen bleiben (mit Ausnahme der Einstrahlung).

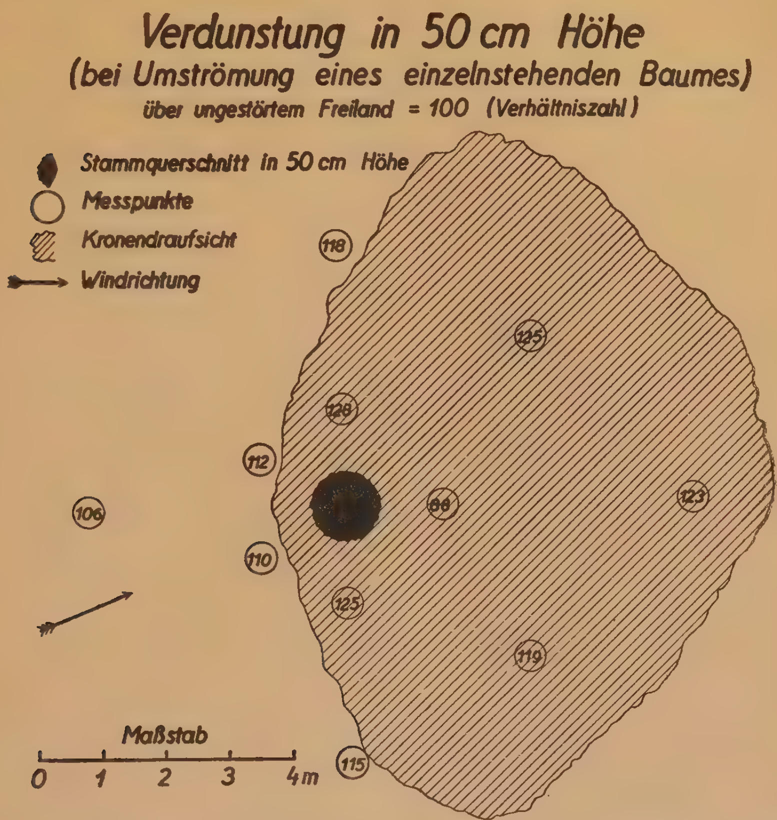


Abb. 15. Erhöhte Verdunstung rund um einen einzelstehenden Baum bei einer Windgeschwindigkeit von 2,61 m/sek. über Freiland in 50 cm Höhe.
Verdunstung über ungestörtem Freiland = 100

Die starke und rasche Austrocknung durch Wind ist allgemein bekannt; freigelegtem Boden kann in kurzer Zeit durch einen trockenen Wind so viel Wasser entzogen werden, daß Erdrisse auftreten oder die feinen Saugwurzeln im Boden vertrocknen und absterben. Neben den Wuchshemmungen können in solchen Fällen auch andere Schädigungen auftreten: E. Rohmeder [siehe [54])] führt aus, daß diese Wurzelverletzungen zu Eingangspforten für die Wurzelfäulepilze werden können.

Einfluß des Dampfhungers

Die Verdunstung steigt im gleichen Verhältnis mit dem Dampfhunger an; an einem Beispiel sollen die Verhältnisse anschaulich gemacht werden: Um Sonnenaufgang soll

im Hochsommer in einem Bestand mit Feuchtigkeit gesättigte Luft von 10° C liegen. Bis 13 Uhr hat sich diese Luft im Bestandsinneren auf 20° C, am offenen Bestandsrand dagegen auf 27° C erwärmt; Wasserdampfanreicherung soll bis dorthin nicht erfolgt sein. Im Bestandsinneren beträgt der Dampfhunger dann 8,2 mm, am Bestandsrand dagegen 17,2 mm Dampfdruck. Am Bestandsrand ist demnach die Verdunstung nur auf Grund des größeren Dampfhungers allein etwas über doppelt so groß wie im Bestandsinneren. Wird noch die unter gewöhnlichen Bedingungen am Bestandsrand herrschende größere Windgeschwindigkeit und die höhere Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung (die zur Erhöhung der Temperatur der verdunstenden Oberfläche führt) und der größere Luftaustausch in Rechnung gestellt — es handelt sich dabei um lauter Größen, die zur Erhöhung der Verdunstung beitragen —, so verschiebt sich die Verdunstung außerdem noch weiter sehr zu Ungunsten des Bestandsrandes.

Im Abschnitt V (Luftfeuchtigkeit) wurde dargelegt, daß der Dampfhunger in Beständen, die der Sonneneinstrahlung zugänglich sind, größer ist als in dichter geschlossenen; Unter- und Zwischenstand wirken wie dichterer Bestandsschluß.

Temperaturen der besonnten Bodenoberfläche stehen dem Verfasser aus eigenen Untersuchungen nicht zur Verfügung. Es gehört nicht zu den Seltenheiten, daß dunkler, besonnter Boden im Sommer in den Mittagsstunden eine Temperatur von 40 bis 55° C annimmt. Nicht nur die oberste Bodenschicht, sondern auch die daran haftende Lufthaut nimmt diese hohen Temperaturen bei längerer Einstrahlung an. In kurzen Abständen lösen sich Teilchen dieser heißen Luft ab und steigen nach oben, oder die warme Lufthaut wird von Zeit zu Zeit vom Winde weggespült. Auf Grund des obengenannten Beispiels kann ungefähr beurteilt werden, wie groß der Dampfhunger in dieser plötzlich und stark erwärmten Lufthaut ist und wie stark die Verdunstung deshalb bei unmittelbarer Sonneneinstrahlung sein muß. *Nach Ansicht des Verfassers ist diese Mikroverdunstung von großer Bedeutung, sie tritt allerdings nur dort in Erscheinung, wo nackter Boden oder tote Pflanzenteile der Sonneneinstrahlung frei ausgesetzt sind.*

Bedeutung der Temperatur

Neben den schon genannten Größen ist die Temperatur der verdunstenden Oberfläche für die Größe der Verdunstung je Zeiteinheit von Bedeutung. Innerhalb des im Walde vorkommenden Temperaturbereiches nimmt die Verdunstung unter sonst gleichen Bedingungen bei einer Temperaturerhöhung der verdunstenden Fläche von 3° C um 1 % zu. Bei ungehinderter Sonneneinstrahlung können Temperaturerhöhungen von 20 bis 30° C vorkommen; die Verdunstung wird dann allein auf Grund dieser Temperaturerhöhung — unter sonst vollständig gleichen Bedingungen — um 7 bis 10 % größer.

Wirtschaftliche Maßnahmen zur Herabsetzung der Verdunstung

Die Maßnahmen zur Abhaltung des Windes wurden schon behandelt (siehe VI); ihre Durchführung ist zur Herabsetzung der Verdunstung genau so wichtig wie zur Beseitigung der übrigen schädlichen Kleinarbeit des Windes.

Die Verhinderung der unmittelbaren Sonneneinstrahlung auf den Boden läßt sich großenteils mit den gleichen Mitteln durchführen. Von ganz außerordentlicher Bedeutung ist das Bedecken des Bodens mit Planzenstoffen dessen Wirkung L. Fabricius [siehe [27]] untersucht hat, und das Mulchieren mit Steinen oder sonstigen wasser- und strahlungsundurchlässigen Gegenständen, das Verfasser [siehe [42]] gegen Verhagerung empfohlen hat. Boden, der auf einem Großteil seiner Oberfläche so gegen unmittelbare Verdunstung geschützt ist, wird immer wesentlich feuchter und viel geringeren Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt sein als freiliegender. Die Bezeichnung Reisigdüngung ist nicht sinngemäß, denn nicht die Düngewirkung, sondern die Bedeckung ist ausschlaggebend; der Ausdruck „Reisigdüngung" sollte deshalb auch im forstlichen Schrifttum nicht verwendet werden.

Bei einem Zuviel an Feuchtigkeit muß dagegen der Einstrahlung und dem Wind freier Zutritt verschafft werden, der Boden verliert dann mindestens einen Teil seines überschüssigen Wassers.

Der Wasserverlust durch Verdunstung aus dem Boden ist eine der wenigen meteorologischen Einzelkräfte, die vom Wirtschafter — oft mit ganz geringen Mitteln — weitgehend abgewandelt werden können.

VIII. Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch gemacht, aus einer Reihe forstmeteorologischer Untersuchungen die Gesetzmäßigkeiten herauszuschälen und daraus Folgerungen für waldbauliche Maßnahmen zu ziehen. Innerhalb des auf diese Weise gewonnenen Rahmens muß der Wirtschafter unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse seine Planungen vornehmen. Starre, allgemein gültige Vorschriften gibt es im Waldbau ebensowenig wie in einem anderen Wissenschaftszweig, der sich mit der Pflege und Entwicklung von Pflanzen befaßt. Jeder Wirtschafter muß auf Grund der örtlichen Erfahrungen die Bedeutung der einzelnen Einwirkungskräfte auf den Bestand und das Gedeihen des Waldes verantwortungsbewußt abwägen. In manchen Fällen können die meteorologisch-klimatologischen Bedingungen allein oder fast allein ausschlaggebend für waldbauliche Maßnahmen sein (z. B. auf Spätfrostlagen, bei starker Sturmgefährdung oder bei ausgesprochener Trockenheit); in anderen Fällen treten sie in ihrer Bedeutung mehr oder weniger zurück. Die einwandfrei feststehenden Ergebnisse der forstmeteorologischen Forschung müssen neben den biologischen, bodenkundlichen und wirtschaftlichen Gegebenheiten vom Forstwirt bei seinen Maßnahmen beachtet werden, wobei den naturgesetzlichen der Vorrang eingeräumt werden muß, wenn die Nachhaltigkeit nicht gefährdet werden soll — ein Außerachtlassen ist besonders bei den heutigen Anforderungen an den deutschen Wald nicht zu verantworten.

Vom Verfasser wurden die bearbeiteten Untersuchungen des Institutes und seine eigenen mit allem Vorbehalt behandelt und ganz besonders auf vorhandene Unzulänglichkeiten, Mängel und Lücken hingewiesen. Dabei hat sich gezeigt, daß noch sehr viele Untersuchungen notwendig sein werden, um bei der Vielfältigkeit des gegebenen Tatbestandes auch nur in den wichtigen Punkten Klarheit zu schaffen. Wenn bei zukünftigen forstmeteorologischen Forschungen aus den Fehlern der vergangenen Untersuchungen die notwendigen Folgerungen gezogen werden, so dürfte sehr viel Zeit, Arbeitsaufwand und Geld gespart und das gesteckte Ziel rascher erreicht werden. Drei Punkte scheinen dabei besonders wichtig:

1. Benutzung der neuesten Geräte, die physikalisch einwandfrei und genau bestimmbare Meßgrößen ergeben, denn nur auf diese Weise ist ein Vergleich von Untersuchungsergebnissen, die an verschiedenen Orten oder von verschiedenen Forschern gewonnen wurden, möglich. Bei der Veröffentlichung von Untersuchungsergebnissen muß der gerätetechnische Teil und die Versuchsanordnung genauestens beschrieben werden, eine Beurteilung der Bedeutung der gewonnenen Ergebnisse ist sonst nicht möglich. Kürzungen in dieser Hinsicht setzen den Wert der Untersuchung stark herab und lassen es nicht geraten erscheinen, wirtschaftliche Maßnahmen auf Grund solcher nur als Ergebnisse veröffentlichten Forschungen zu treffen.

2. Eine enge Zusammenarbeit mit den Instituten für Waldbau, Bodenkunde und forstliche Tier- und Pflanzenkunde ist für den Forstmeteorologen deshalb wichtig und unerläßlich, weil er nur auf diese Weise unter der Vielzahl der vorhandenen Fragen auf diejenigen hingeführt wird, die von großer praktischer Bedeutung sind. Bei den heutigen Ansprüchen an den deutschen Wald sollen forstmeteorologische Forschungen in erster Linie wirtschaftlich bedeutsame Fragen klären und erst in zweiter Linie den Zweck haben, unsere Kenntnis vom Naturgeschehen zu vertiefen.

3. Die Mitarbeit der Forstwirte bei forstmeteorologischen Untersuchungen ist zur Förderung und Fruchtbarmachung unerläßlich. Es soll hier nicht die Rede von der Mitarbeit der Forstleute bei Außenuntersuchungen sein, die allen Angehörigen des Forstmeteorologischen Institutes in zuvorkommender Weise jederzeit gewährt wurde, sondern von der Aufnahme und der Verwertung der bisherigen forstmeteorologischen Arbeiten in der Praxis. Die vom Verfasser anläßlich früherer Veröffentlichungen schon öfters ausgesprochene Bitte, die Forstleute möchten kritisch zu den gefundenen Ergebnissen Stellung nehmen, wird hier in der Hoffnung auf Erfüllung wiederholt. Bei den vielgestaltigen Beziehungen zwischen Forstmeteorologie und Forstwirtschaft ist ohne das Urteil des Forstmannes im Außendienst, der meist nur ein kleines Gebiet — dieses aber dafür hervorragend gut — kennt, die Allgemeingültigkeit forstmeteorologischer Untersuchungsergebnisse nur schwer festzulegen. Auch das schärfste Urteil fördert: war es begründet, so müssen Richtigstellungen erfolgen; war es unbegründet, so stehen die gefundenen Ergebnisse nur noch fester. Eine begründete Stellungnahme zu der vorliegenden Arbeit von seiten der Forstwirte würde für nachfolgende Untersuchungen sehr fördernd sein und wäre für den Verfasser eine große Befriedigung.

Den Anstoß zur Bearbeitung der Zusammenhänge von „Waldbau und Forstmeteorologie" ging von Herrn Geheimrat Prof. Dr. A. Schmauß und Herrn Geheimrat Prof. Dr. L. Fabricius aus; ihnen verdankt der Verfasser auch viele bedeutungsvolle Anregungen. Herr Ministerialrat Dr. Th. Künkele, Herr Professor Dr. R. Geiger und Herr Regierungsforstrat Dr. E. Rohmeder haben ebenfalls wertvolle Hinweise gegeben. Es ist dem Verfasser eine angenehme Pflicht, den genannten Herren den verbindlichsten Dank dafür auszusprechen.